



forschen.
vernetzen.
anwenden.

Innovationsreport 2018

Industrielle Gemeinschaftsforschung

IGF-Forschungsvorhaben 19073 N

Entwicklung einer Methode zur Planung kostenoptimaler Produktionsprogramme unter gezielter Nutzung von Lagerbeständen als Speicher von im Produktionsprozess umgesetzter Energie

Laufzeit:

01.03.2016 – 31.03.2018

Beteiligte Forschungsstelle(n):

IPH - Institut für
Integrierte Produktion Hannover gGmbH

Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V.,
Bereich Gasprozesstechnik & Energiewandlung

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 19073 N

Thema

Entwicklung einer Methode zur Planung kostenoptimaler Produktionsprogramme unter gezielter Nutzung von Lagerbeständen als Speicher von im Produktionsprozess umgesetzter Energie

Berichtszeitraum

01.03.2016 bis 31.03.2018

Forschungsvereinigung

Umwelttechnik

Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1: IPH - Institut für Integrierte
Produktion Hannover gGmbH

Forschungseinrichtung 2: Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V.

Hannover, 03.08.2018

Christian Böning

Ort, Datum

Name und Unterschrift des Projektleiters
Forschungsstelle 1

Duisburg, 06.04.2018

Dr. Stefan Peil

Ort, Datum

Name und Unterschrift des Projektleiters
Forschungsstelle 2

Inhalt

Thema	1
Berichtszeitraum.....	1
Forschungsvereinigung	1
Forschungseinrichtungen.....	1
1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	3
1.1 Anlass für den Forschungsantrag und Ausgangssituation	4
2 Gegenüberstellung der erzielten und der angestrebten Ergebnisse	6
3 Darstellung der verwendeten Methoden und erzielten Ergebnisse	11
3.1 Einflussfaktoren auf den Strompreis und Prognose von Strompreisverläufen.....	11
3.2 Datenaufnahme und Strukturierung von Arbeitsplänen.....	22
3.3 Analyse der Rahmenbedingungen für ein Optimierungsmodell.....	37
3.4 Formulierung des Optimierungsmodells	44
3.5 Anwendung des Optimierungsmodells zur Produktionsprogrammplanung.....	49
3.6 Untersuchung der Potenziale und Grenzen der Methode	53
4 Verwendung der Zuwendung.....	62
4.1 Verwendung der Zuwendung in den Forschungseinrichtungen	62
4.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	62
4.3 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse	62
5 Fortgeschriebener Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	64
6 Zusammenfassung und Ausblick	67
7 Literatur	69

1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Vor dem Hintergrund des Ausbaus der erneuerbaren Energien ist zunehmend mit einem temporären Überangebot an elektrischer Energie und einem dadurch verursachten Preisverfall an der Leipziger Strombörse zu rechnen. Bereits jetzt weist der an der Strombörse gehandelte Strom eine hohe Preisvolatilität auf. Aus diesem Grund werden Energiespeicher benötigt, die einen Ausgleich zwischen Energieangebot und -nachfrage zur Sicherstellung der Netzstabilität herstellen können. Dabei kann die produzierende Industrie durch eine Anpassung ihres Verbrauchs über eine Verlagerung stromintensiver Produktionsschritte in Zeiten negativer Residuallast einen Beitrag leisten.

In dem Forschungsprojekt wurde eine Methode zur Produktionsprogrammplanung entwickelt, die diesen Ansatz aufgreift. Die durch die Verlagerung der stromintensiven Produktionsschritte in Zeiten hoher Verfügbarkeit und damit niedriger Stromkosten hergestellten Produkte werden wie in Bild 1 dargestellt gelagert.

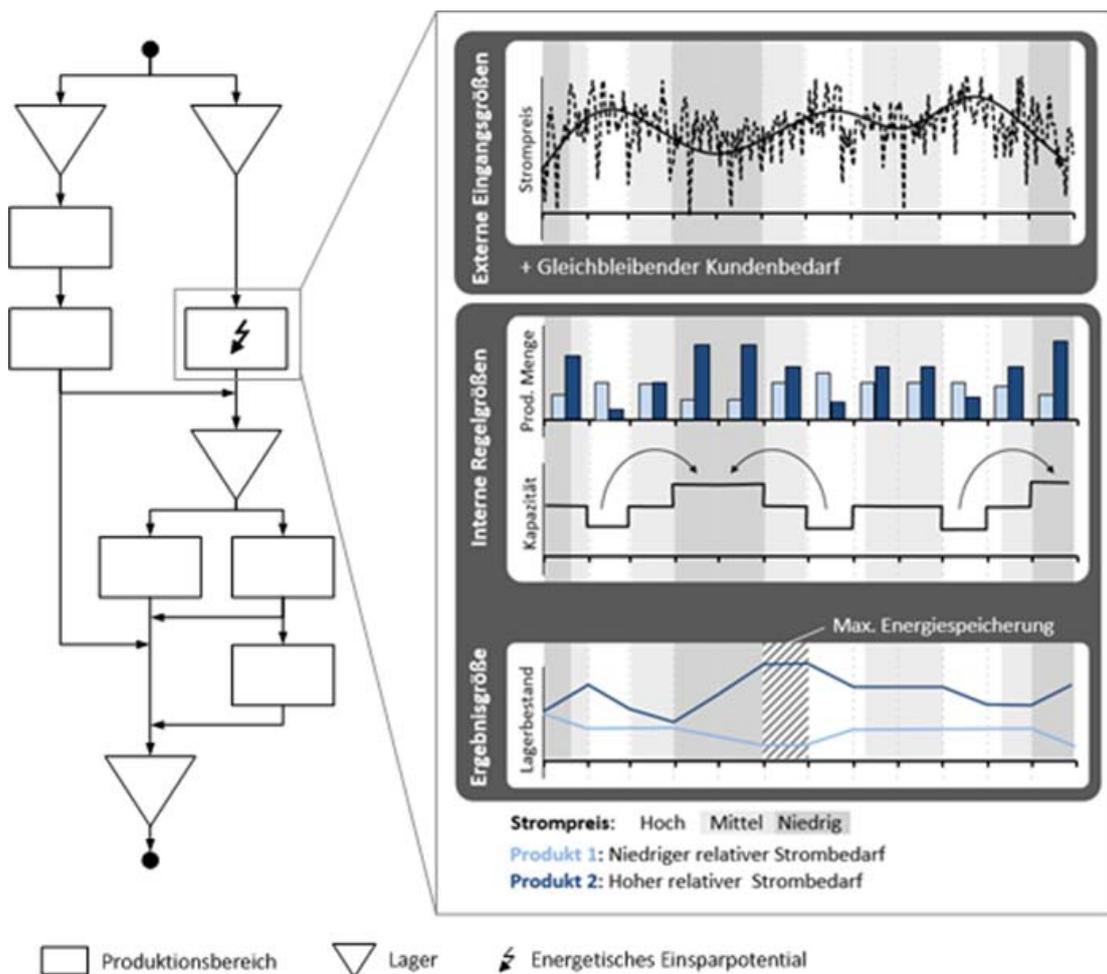


Bild 1 Energiekostenoptimierte Produktionsprogrammplanung eines Produktionsbereichs mit energetischem Einsparpotenzial der innerbetrieblichen Lieferkette eines Unternehmens

Folglich kann das gefüllte Lager im idealen Fall als eine verlustfreie Stromspeicherung gesehen werden. In Zeiten geringerer Verfügbarkeit (und höherer Strompreise) kann der Kundenbedarf weiterhin über den Lagerbestand gedeckt werden, während die Produktion entweder mit geringerer Kapazität betrieben wird oder sich auf solche Herstellungsprozesse konzentriert, die weniger elektrische Energie benötigen.

Vor dem Hintergrund volatiler Strompreise und beschränkter Produktionskapazitäten ist hierfür eine gezielte Anpassung der Produktionsprogrammplanung erforderlich. Voraussetzung ist eine Entkopplung von Produktionsschritten mit energetischem Einsparpotenzial, wobei Halbzeuge eingelagert und die Produktherstellung in einer späteren Periode fortgesetzt werden kann.

Unter der Grundannahme prognostizierbarer Strompreisschwankungen können Unternehmen so befähigt werden, ihren Energieverbrauch am Energieangebot des Strommarktes zu orientieren und damit ihre Energiekosten zu senken.

Anlass für den Forschungsantrag und Ausgangssituation

Energie gilt für produzierende Unternehmen als ein wesentlicher Kostenfaktor, dessen Bedeutung in der Vergangenheit stark zugenommen hat und weiter zunehmen wird. In den vergangenen Jahren bezahlten Stromverbraucher einen kontinuierlich steigenden Strompreis, bedingt durch den Ausbau der erneuerbaren Energien und den damit verbundenen Umlagen und Steuern. Mit weiter voranschreitendem Ausbau ist davon auszugehen, dass sich die Volatilität des Energieangebots erhöhen wird. Für die Zukunft ist nach dem Ausstieg aus der Kernkraft bis 2022 mit einem höheren Anteil kostenintensiver konventioneller Kraftwerke und folglich mit weiter steigenden Strompreisen zu rechnen.

Leistungsfähige Technologien zur Energiespeicherung, die einen Ausgleich zwischen Energieangebot und -nachfrage herstellen könnten, stehen bislang nicht zur Verfügung. Daher ist es absehbar, dass die zeitlichen Schwankungen des Strompreises künftig stärker an die Stromverbraucher weitergegeben werden.

Im Rahmen des Forschungsprojektes verfolgten die Forschungsstellen das Ziel, Lagerbestände als (verlustfreie) Energiespeicher zu nutzen. Dabei wurden energieintensive Produktionsschritte in Zeiten hoher Energieverfügbarkeit und damit niedriger Energiekosten durchgeführt und die entsprechenden (Zwischen-)Produkte bis zur weiteren Verwendung oder Auslieferung gelagert. Durch die Methode zur Nutzung von Lagerbeständen als Energiespeicher sollten kleine und mittlere Unternehmen (KMU) befähigt werden, von

Schwankungen des Strompreises zu profitieren. Dies und die spezifischen energiepolitischen Rahmenbedingungen in Deutschland bildeten den Ausgangspunkt für das vorliegende Projekt.

Unter der Prämisse prognostizierbarer Strompreisschwankungen werden KMU so in die Lage versetzt, den Energieverbrauch am Energieangebot des Strommarktes zu orientieren und dadurch Energiekosten zu senken. Den Einsparungen beim Strompreis stehen Logistikkosten gegenüber, die beispielsweise durch die Lagerhaltung entstehen. Die Minimierungsziele der Energiekosten und der Lagerhaltungskosten verhalten sich gegensätzlich. Eine systematische Entscheidungsgrundlage für eine Positionierung zwischen diesen beiden Zielen mittels Einflussnahme auf die Produktionsprogrammplanung stand bislang für KMU nicht zur Verfügung.

Vor dem Hintergrund beschränkter Produktions- und Lagerkapazitäten bot sich eine gezielte Anpassung der Produktionsprogrammplanung an. Das Projekt zielte folglich darauf ab, dass KMU bei gezielter Nutzung von Lagerbeständen als Speicher von im Produktionsprozess umgesetzter Energie und einem entsprechend angepassten Produktionsprogramm Energiekosten senken können. Damit insgesamt Kosten trotz steigender Aufwendungen (z. B. für Lagerhaltung und Kapitalbindung) eingespart werden können, wird eine Planungsmethode für kostenoptimale Produktionsprogramme entwickelt, welche die Lagerung von Produkten und Halbzeugen als Möglichkeit zur Energiespeicherung nutzt.

2 Gegenüberstellung der erzielten und der angestrebten Ergebnisse

AP	Teilziel lt. Antrag	Erwartete Ergebnisse	Erzielte Ergebnisse
1	Identifikation von Einflussfaktoren auf den Strompreis und Ableitung von Verlaufsprognosen (Bearbeitung: IPH, IUTA)	Identifizierung der Treibergrößen auf die Strompreisentwicklung	Ermittelt wurden die Bestandteile des Strompreises und die Einflussgrößen auf seine Höhe. Betrachtet wurden die Ausnahmeregelungen für das produzierende Gewerbe, die Preisentwicklung in den vergangenen Jahren und erwartete Einflüsse.
		Aussagen zur zukünftigen Entwicklung der Stromtarife	Durch Expertengespräche mit dem Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e.V. (VIK), verschiedenen Vertretern aus Unternehmen sowie von Energieversorgern und Internetrecherchen wurden aktuelle Stromtarife für KMU mit stromintensiver Produktion ermittelt. Ermittelt wurden auch die bisherigen politischen Anreize zur Tarifentwicklung und die Grenzen der Gültigkeit flexibler Stromtarife für KMU.
		Anforderungen an Prognosetools für den Strompreis bei einer optimierten Produktionsplanung	Durch die Betrachtung des Vorgehens einer Produktionsprogrammplanung in KMU konnten Anforderungen an ein Prognosetool entwickelt werden. Diese Anforderungen beziehen sich auf den Zeitraum, die Auflösung, die Genauigkeit und den Zeitpunkt der Prognose.
		Strompreisprognose für eine optimierte Produktionsplanung	Es wurden die verfügbaren Ansätze zur Strompreisprognose und ihre Anwendungsgebiete ermittelt. Schließlich erfolgte die Entwicklung einer angepassten Strompreisprognose durch die Hochschule Frankfurt (Oder).

AP	Teilziel lt. Antrag	Erwartete Ergebnisse	Erzielte Ergebnisse
2	Entwicklung einer Strukturierungssystematik für Arbeitspläne (Bearbeitung: IPH, IUTA)	Bestimmung von Auswahlkriterien für Beispielunternehmen	Ausgewählt wurden Unternehmen, die sich durch einen hohen Strombedarf in den Produktionsprozessen auszeichnen. Dabei mussten sich einzelne Produkte bzw. Produktionsschritte hinsichtlich ihres spezifischen Strombedarfs signifikant unterscheiden. Ferner musste die Produktion so flexibel sein, dass ein Wechsel der Produkte aufwandsarm realisierbar ist.
		Aufnahme der innerbetrieblichen Lieferketten und des Energieflusses in ausgewählten Produktionsbetrieben	Bei Vor-Ort-Terminen in Unternehmen des Apparatebaus, des Maschinenbaus, der Metallverarbeitenden Industrie sowie der Papierindustrie wurden für ausgewählte Produkte die innerbetriebliche Lieferkette sowie der Energiefluss ermittelt. Soweit aus dem betrieblichen Energiemanagementsystem keine Daten zum Einsatz von elektrischer Energie in einzelnen Produktionsschritten zu extrahieren waren, wurden entsprechende Messungen durchgeführt.
		Entwicklung eines Vorgehens zur Strukturierung von Arbeitsplänen	Anhand der aufgenommenen innerbetrieblichen Lieferketten und Energieflüsse konnte ein Vorgehen zur Strukturierung von Arbeitsplänen entwickelt werden. Dazu wird zum einen das energetische Einsparpotential als auch die angrenzenden Prozessschritte verschiedener Prozesse untersucht. Mit dem Vorgehen können KMU geeignete Produktionsschritte zur Optimierung identifizieren.

AP	Teilziel lt. Antrag	Erwartete Ergebnisse	Erzielte Ergebnisse
3	Analyse der Rahmenbedingungen für ein Optimierungsmodell (Bearbeitung: IPH, IUTA)	Energiewirtschaftliche und produktionslogistische Voraussetzungen zur erfolgreichen Anwendung des Optimierungsmodells	In Interviews mit Experten aus dem energiewirtschaftlichen und produzierenden Bereich konnten grundsätzliche Voraussetzungen zur erfolgreichen Anwendung des Optimierungsmodells aufgenommen werden. Diese erste Identifikation der Erfolgsfaktoren war richtungsweisend für die weitere Ausarbeitung der Zielgrößen des Optimierungsmodells.
		Ermittlung der monetären Einflussgrößen	Auf Basis der Treiber und der grundlegenden Zielgrößen der Nutzung von Lagerbestand als Energiespeicher konnten allgemeine Komponenten identifiziert werden. Anhand von Praxisdaten der produzierenden KMU des projektbegleitenden Ausschusses (PA) wurden die relevanten Komponenten der Energie-, Lager- und Produktionskosten bestimmt und abgebildet. Es wurden Kosten, die nicht durch das Optimierungsmodell tangiert werden, ausgeschlossen.
		Ermittlung und Eingrenzung betrieblicher Restriktionen bzw. Rahmenbedingungen	Für die identifizierten Komponenten der Planungsmethode wurden unterschiedliche Restriktionen und Rahmenbedingungen aufgenommen und untersucht. Diese wurden daraufhin in Rücksprache mit den involvierten produzierenden KMU bewertet und eingegrenzt.

AP	Teilziel lt. Antrag	Erwartete Ergebnisse	Erzielte Ergebnisse
4	Formulierung des Optimierungsmodells (Bearbeitung: IPH)	Mathematische Modellierung für eine kostenoptimale Produktionsplanung unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen	Zur mathematischen Formulierung des Optimierungsmodells wurden diverse Indizes, Variablen und Parameter definiert. Diese konnten dann mit Hilfe von Gleichungen und Ungleichungen dazu genutzt werden, um die identifizierten Rahmenbedingungen der Methode abzubilden. Im Ergebnis konnte so eine Zielfunktion sowie mehrere Nebenbedingungen des Optimierungsmodells aufgestellt werden.
5	Lösung des Optimierungsmodells und Überführung in eine Methode zur Produktionsprogrammplanung (Bearbeitung: IPH)	Lösungen des Optimierungsmodells	Die Implementierung des Optimierungsmodells erfolgte mit dem Solver Gurobi, welcher in Python umgesetzt wurde.
		Entwicklung eines heuristischen Lösungsalgorithmus für komplexe Testinstanzen	Zur Lösung komplexerer Testinstanzen wurde eine Heuristik entwickelt. Diese besteht aus einem Eröffnungsverfahren, in dem eine zulässige Lösung konstruiert wird und einem Verbesserungsverfahren, in welchem bessere Lösungen gesucht werden. Zur optimalen Untersuchung des Lösungsraums wurde der Ansatz des Simulated Annealing genutzt.
		Implementierung des Optimierungsmodells als Software-Demonstrator	Das lineare Optimierungsmodell und die Heuristik wurden mittels Python in einem Excel-basierten Software-Demonstrator umgesetzt. Dies ermöglicht KMU Produktionsprogramme entsprechend ihrer vorliegenden Produktionsparameter zu planen und umzusetzen.

AP	Teilziel lt. Antrag	Erwartete Ergebnisse	Erzielte Ergebnisse
6	Validierung sowie Untersuchung der Potenziale und Grenzen des Methoden-einsatzes (Bearbeitung: IPH)	Ermittlung des Einsparpotenzials durch Anwendung des Optimierungsmodells auf standardisierte Parameter eines KMU	Anhand der aufgenommenen Daten der metallverarbeitenden KMU konnten standardisierte Parameter für die Produktionsprogrammplanung definiert werden. Auf Basis dieser Parameter konnte so das Einsparpotenzial von KMU durch die energiekostenoptimierte Produktionsprogrammplanung ermittelt werden.
		Parameterstudie zu Potenzialen und Grenzen der Methode	In der Parameterstudie konnten signifikante Parameter anhand von Veränderungen zu einem definierten Standard ermittelt werden. Anhand dieser Szenarien wurden die Optimierungspotenziale der Methode untersucht und in einen gesamtwirtschaftlichen Kontext gebracht.
7	Projektmanagement, Transfer und Ergebnisdokumentation (Bearbeitung: IPH, IUTA)	Information Fachöffentlichkeit über Ergebnisse des Forschungsprojekts	Die Fachöffentlichkeit wurde durch zum Projektstart durch eine Pressemitteilung sowie die Einrichtung einer Internetpräsentation informiert. Die Projektfortschritte wurden kontinuierlich durch Vorträge (2) und Veröffentlichungen (3) vorgestellt.
		Organisation von PA-Treffen	Insgesamt wurden drei Sitzungen des PA durchgeführt.
		Abschlussdokumentation	Die Ergebnisse des Projekts werden in einem gemeinsamen Schlussbericht der beiden Forschungseinrichtungen zusammengefasst und stehen damit allen Interessierten zur Verfügung.

3 Darstellung der verwendeten Methoden und erzielten Ergebnisse

3.1 Einflussfaktoren auf den Strompreis und Prognose von Strompreisverläufen

Zur Prognose von Strompreisverläufen wurden auf Basis von Literaturrecherchen und Gesprächen mit Mitgliedern des PA sowie Vertretern von Energieversorgern und Fachverbänden die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Strompreisentwicklung identifiziert und die Möglichkeiten eines dynamischen Tarifmodells für KMU untersucht.

Einflussfaktoren auf Strompreis

Die Einflussfaktoren auf den Strompreis konnten grundlegend in angebots- und nachfragebedingte Faktoren unterteilt werden. Das Angebot des Strommarktes ist dabei im Wesentlichen durch die fundamentale Zusammensetzung des Strommixes (Bild 2) und die schwankenden Konditionen für die Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien gekennzeichnet.

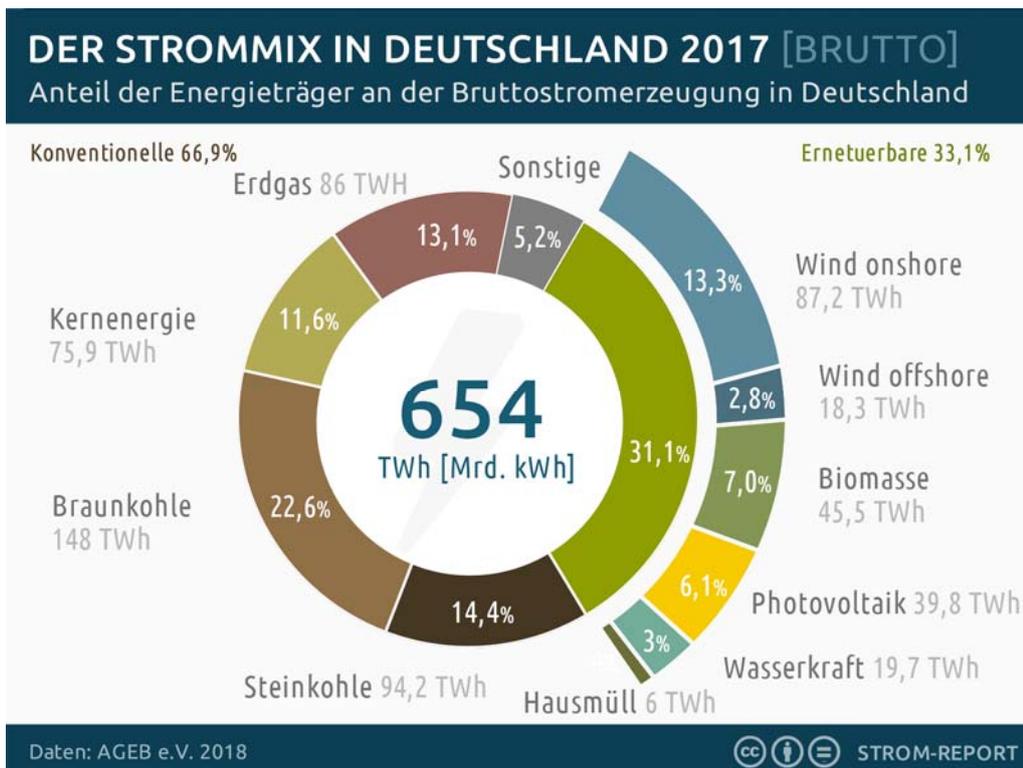


Bild 2 Strommix in Deutschland 2017 [Age17]

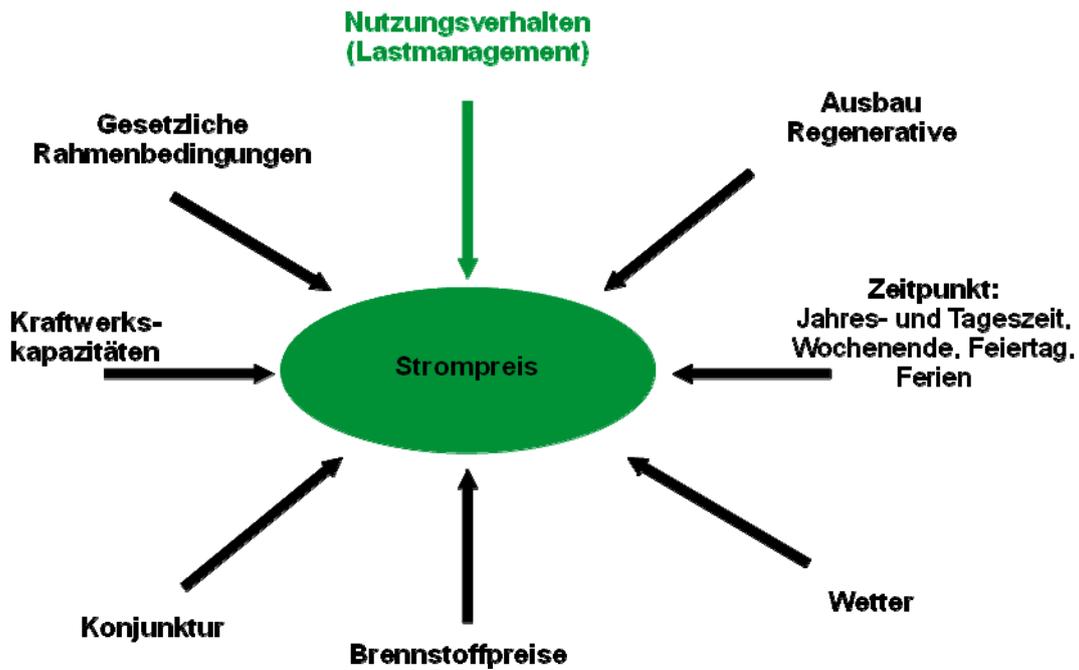


Bild 3 Einflussfaktoren auf den Strompreis

Fundamentale Einflussfaktoren sind beispielsweise die Inbetriebnahme oder Stilllegung von Kraftwerkskapazitäten oder der Anstieg von Rohstoffkosten thermischer Kraftwerke. Angebotsschwankungen aus erneuerbaren Energien korrelieren stark mit den vorherrschenden Wetterbedingungen, welche mittels Windstärke, Sonnendauer und -intensität sowie Niederschlagsmenge beschrieben werden können (Bild 3). Das Nachfrageverhalten am Strommarkt ist abhängig von Wetter, konjunktureller Lage und typischen Betriebszeiten (Wochentage, Feiertage).

Preisbildung an der Börse [Ago12, Wir18]

Vor der Liberalisierung des Strommarktes 1998 gab es keinen direkten Wettbewerb zwischen den Stromanbietern. Erzeugung, Übertragung und Vertrieb lag in den Händen einzelner Unternehmen, welche klar abgegrenzte Gebiete versorgten. Der Strompreis wurde von diesen nach Maßgabe von Durchschnittskosten gebildet, Stromlieferverträge wurden zumeist über längere Zeiträume abgeschlossen.

Nachdem die Deregulierung 1998 in deutsches Recht umgesetzt wurde, war die Grundlage für einen entstehenden Energiegroßhandel gelegt. In der Folge wurden die Stromerzeugung und der Stromvertrieb entkoppelt und es wurden gleiche Bedingungen für den Stromnetzzugang für alle Akteure des Marktes ermöglicht. Energieerzeugern und reinen

Vertriebsunternehmen wurde dadurch die Notwendigkeit genommen eine eigene Übertragungs-Infrastruktur aufzubauen.

Die hohen Kosten für den Aufbau und den Parallelbetrieb mehrerer Energienetze rechtfertigen allerdings mit Blick auf die Übertragung von Strom die Existenz sogenannter natürlicher Monopole, die auf der Netzebene auch heute weiterhin bestehen.

Seit der Deregulierung 1998 haben die Energiemärkte einen gewaltigen Wandel durchlebt. Es kam zu einer Verdrängung der langfristigen Stromlieferverträge durch kurzfristigere, einfache Austauschbeziehungen in dessen Folge börsliche und bilaterale Märkte entstanden sind. Auf diese Weise konnten sich Handelsplätze wie die European Energy Exchange AG (EEX), Leipzig, bzw. der Spotmarkt im Rahmen der EPEX Spot, Paris, etablieren.

Mit der Entstehung der Handelsmärkte und dem diskriminierungsfreien Zugang zum Energievertrieb an Endverbraucher gibt es nun verschiedenste Möglichkeiten Energie zu vermarkten, zu handeln und zu beschaffen. Eine Teilnahme an den Energiemärkten ermöglicht es dadurch freie Kapazitäten gewinnbringend abzusetzen bzw. Beschaffungsmengen zu möglichst geringen Kosten zu besorgen.

Dabei haben die Energiemärkte die Funktion mit dem zur Verfügung stehenden Angebot an Elektrizität die zu bedienende Nachfrage an Strom zu jedem Zeitpunkt komplett zu decken.

Strom kann an den Märkten mit unterschiedlichen Zeithorizonten der Lieferung gehandelt werden:

Im sogenannten **Termingeschäft** wird Strom im Vorfeld einer mittel- bis langfristig späteren Lieferung, am Spotmarkt wird Strom mit zeitnaher Lieferung gehandelt.

Die Verträge am Terminmarkt bieten Stromlieferungen mit einer Laufzeit von einer Woche bis zu mehreren Jahren. Dadurch wird den Teilnehmern eine möglichst risikofreie Grundversorgung über einen längeren Zeitraum hinweg gewährleistet.

Spotgeschäfte dagegen bieten den Handel mit kurzfristigen Verträgen einer Lieferung von Strom für eine Stunde des folgenden Tages (**Day-Ahead-Markt**). Es können aber auch Stunden und ¼-Stunden-Verträge mit Lieferung noch am selben Tag bis zu 45 min. vor Fälligkeit gehandelt werden (**Intraday-Markt**).

Die laufende Preisfindung an der Börse erfolgt nach dem Prinzip „Merit-Order“ am Schnittpunkt zwischen Angebot und Nachfrage.

Die Verkaufsangebote der Stromerzeuger für bestimmte Strommengen werden nach Preisen aufsteigend sortiert (Bild 4). Am Günstigsten ist Strom aus Windkraft- und Photovoltaik-Anlagen, dann folgen Wasser-, Atom- und Braunkohlekraftwerke sowie Steinkohle- und Gas- und Heizölkraftwerke. Das zur Deckung der Nachfrage benötigte letzte Kraftwerk bestimmt den Strompreis am Spotmarkt. Dies ist das sogenannte Grenzkraftwerk. Es bestimmt somit die Gewinnmargen der kostengünstigeren Anbieter. Steigt der Verbrauch, so wird Strom aus weiteren Kraftwerken benötigt und der Strompreis steigt.

Je nach Menge des eingespeisten Stroms aus Windkraft- und Solaranlagen wird also ein Kraftwerk mit geringeren oder höheren Betriebskosten zum Grenzkraftwerk. Entsprechend variieren die Strompreise an der Börse in Abhängigkeit vom Windangebot bzw. der Solarstrahlung.

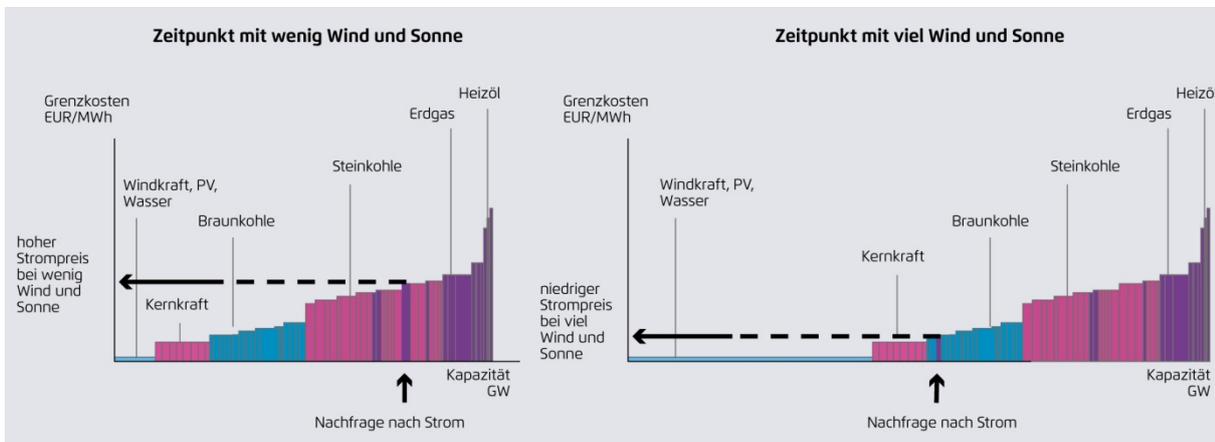


Bild 4 Strompreisbildung nach dem Merit-Order-Prinzip [Ago12]

Strom aus erneuerbaren Energien ist subventioniert, hat gesetzlichen Einspeisevorrang vor konventionellem Strom und steht damit am Anfang der Angebotsskala. Solarstrom kommt bei entsprechenden Wetterlagen massiv in der Tageskerzeit, wenn die Last – und mit ihr früher auch der Strompreise – die Mittagsspitze erreichen. Dort verdrängt er überwiegend teure Spitzenlastkraftwerke (besonders Gaskraftwerke und Pumpspeicher). Diese Verdrängung senkt den gesamten resultierenden Börsenstrompreis und führt zum Merit-Order-Effekt der Photovoltaik-Einspeisung (siehe Bild 5).

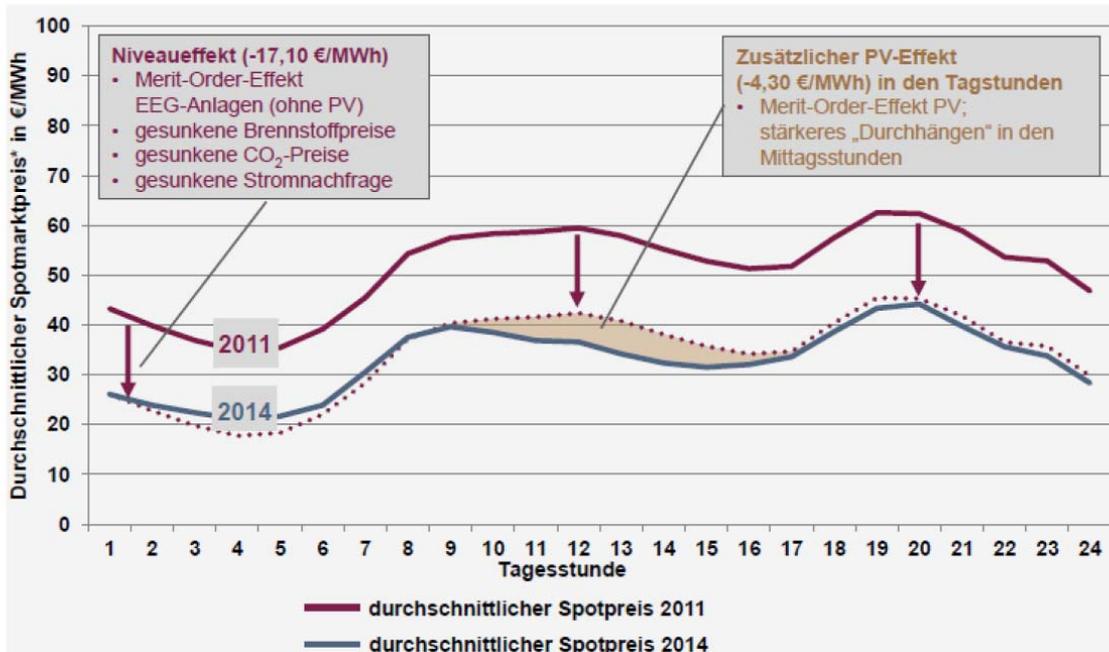


Bild 5 Einfluss von Photovoltaik-Strom auf die durchschnittlichen Strompreise an der Strombörse [Wir18]

Mit den sinkenden Preisen sinken die Gewinne aller konventionellen Stromerzeuger (Kernkraft, Kohle, Gas). Weiterhin verringert Strom aus erneuerbaren Energien die Auslastung insbesondere der klassischen Spitzenlastkraftwerke. Die an der Strombörse gehandelten Strommengen entsprachen 2011 etwa einem Drittel der gesamten deutschen Stromerzeugung. Es ist davon auszugehen, dass die Preisbildung an der Börse auch außerbörsliche Preise am Terminmarkt in vergleichbarer Weise beeinflusst.

Bestandteile des Strompreises beim Kunden

Der vom Kunden zu zahlende Strompreis richtet sich nach den mit dem jeweiligen Stromanbieter vereinbarten Stromtarif.

In Bild 6 ist die Preisentwicklung der vergangenen Jahre für Industriekunden mit einem Jahresverbrauch zwischen 2 und 20 GWh/anno dargestellt. Die Adressaten des Projektes sind KMU mit einem typischen Jahresverbrauch an elektrischer Energie zwischen 1 und 10 GWh.

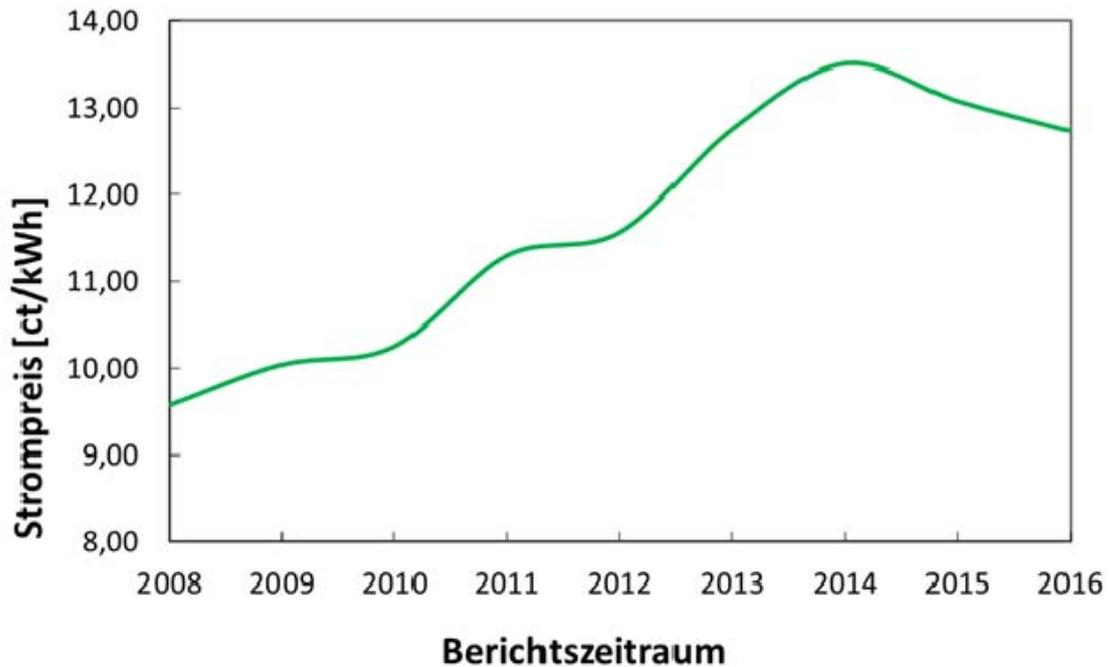


Bild 6 Strompreis für Industriekunden [EUR18]

Der Strompreis ist das Entgelt für die Belieferung mit elektrischer Energie und umfasst neben der Stromerzeugung auch die Netznutzung sowie eine Vielzahl von Abgaben, Umlagen und Steuern. Dabei haben sich in den vergangenen Jahren insbesondere die Erneuerbare Energien Gesetz (EEG)-Umlage sowie die Stromsteuer stark erhöht und dominieren damit die Zusammensetzung des Strompreises (siehe Bild 7).

Mit der EEG-Umlage soll der Ausbau der erneuerbaren Energien gefördert werden. Sie wird von den Letztverbrauchern gezahlt, die sich nicht befreien lassen können. Die Höhe wird jährlich festgelegt und beträgt im Jahr 2018 6,792 ct/kWh. Die EEG-Umlage gleicht die Differenz zwischen den Vergütungszahlungen und dem Verkaufserlösen für Erneuerbare Energien-Strom aus. [Wir18]

Stromintensive Unternehmen des produzierenden Gewerbes sind durch die besondere Ausgleichsregelung im EEG zum Schutz ihrer Wettbewerbsfähigkeit von der EEG-Umlage teilweise befreit (§ 40 EEG sowie zugehörige Regelungen §§ 41-44 EEG). Antragsberechtigt sind Unternehmen des produzierenden Gewerbes mit einem Stromverbrauch über 1 GWh/a und einem Verhältnis der Stromkosten zur Bruttowertschöpfung des Unternehmens von mindestens 14 %. Sind diese Voraussetzungen erfüllt, wird die EEG-Umlage für das Unternehmen wie folgt begrenzt: Für den Stromanteil bis 1 GWh/a wird die EEG-Umlage nicht begrenzt. Für den Stromanteil zwischen 1 und 10 GWh/a sind 10 % der EEG-Umlage zu bezahlen. Für den Stromanteil zwischen 10 und 100 GWh/a sind 1 % der

EEG-Umlage zu bezahlen. Für den Stromanteil über 100 GWh/a beträgt die EEG-Umlage 0,05 Cent/kWh. Für Betriebe mit einem Strombezug über 100 GWh/a und einem Verhältnis der Stromkosten zur Bruttowertschöpfung von mindestens 20 % ist die EEG-Umlage auf 0,05 Cent/kWh begrenzt.

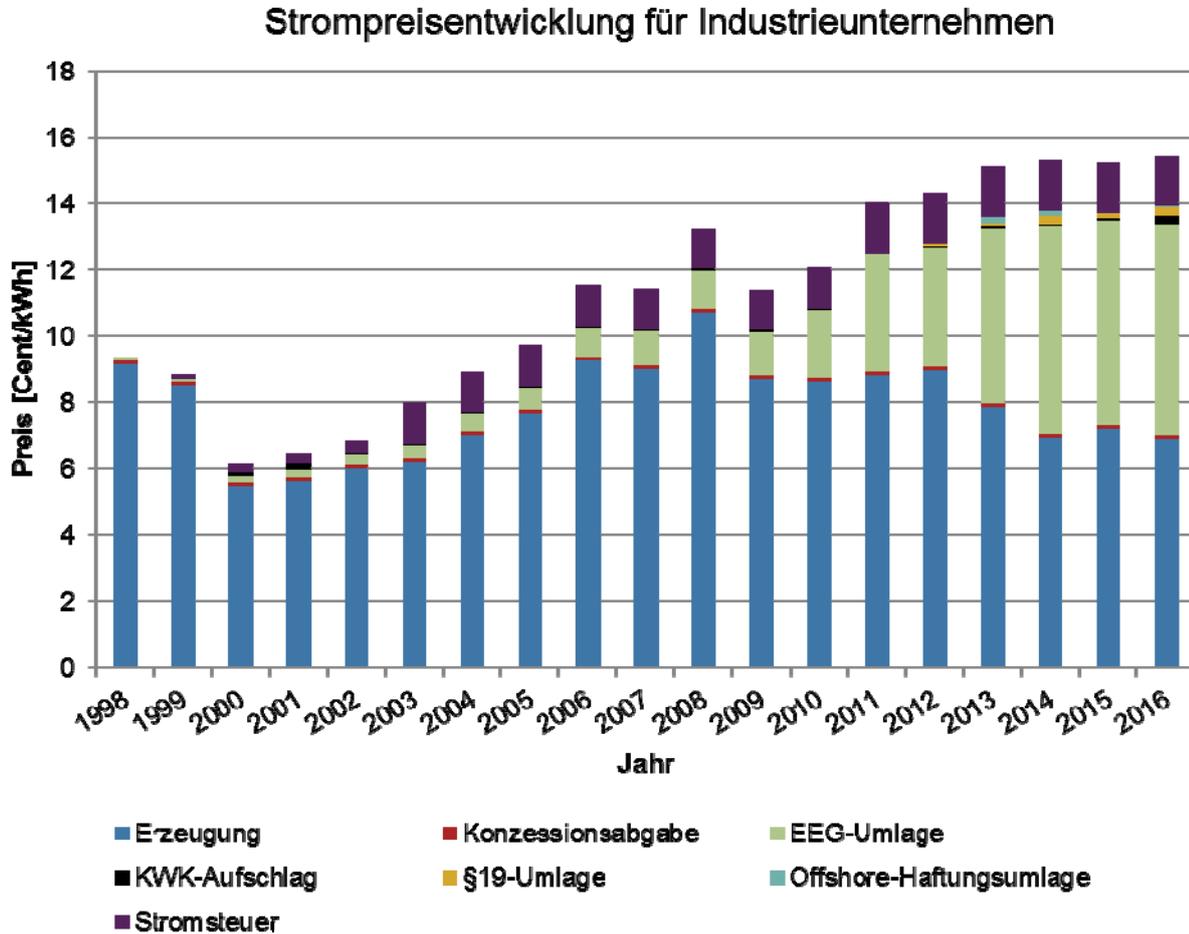


Bild 7 Entwicklung der Bestandteile des Strompreises [Quelle: BDEW; Stand: 01/2016]

Die Stromsteuer wird in Deutschland vom Bund erhoben und fällt beim Verbrauch von elektrischem Strom an. Der reguläre Steuersatz beträgt 2,05 ct/kWh (§3 StromStG), wobei es u. a. für Strom aus erneuerbaren Energien (§9 Strom StG) eine Befreiung gibt. Darüber hinaus bestehen für bestimmte Prozesse oder Verfahren (Herstellung von Glas, Ziegel oder Zement, Metallerzeugung und -bearbeitung, chemische Reduktionsverfahren und Elektrolyse) nach § 9a StromStG die Möglichkeit eines Steuererlasses bzw. einer -erstattung. Ferner können Unternehmen des produzierenden Gewerbes Steuerentlastungen für den betrieblich genutzten Strom in Höhe von 0,5 ct/kWh (§ 9b StromStG) oder im Rahmen des Spitzenausgleichs (§ 10 StromStG) beantragen.

Neben der EEG-Umlage und der Stromsteuer werden zahlreiche weitere Netzentgelte unter anderem für die atypische Netznutzung (§19 StromNEV), Konzessionsabgaben für die Verlegung und den Betrieb von Versorgungsleitungen unter Nutzung öffentlicher Wege (Konzessionsabgabenverordnung – KAV), die Umlage zur Förderung der Kraft-Wärme-Kopplung (§ 9 KWKG) und die Offshore-Haftungsumlage zur Deckung von Schadensersatzansprüchen für verspäteten Netzzugang oder Netzausfall (§ 17f EnWG) erhoben. Für diese Netzentgelte bzw. Zuschläge bestehen Reduzierungen für energieintensive Unternehmen ab einem Jahresverbrauch von 1 GWh. Als energieintensives Unternehmen im Sinne des § 9 KWKG gelten Unternehmen, deren Stromkosten im vorangegangenen Jahr mehr als 4 % des Umsatzes betragen.

Nach Erhebungen des Verbandes der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e.V. (VIK) liegt der Strompreis für Mittelspannungskunden auf einem zehnjährigen Tiefpunkt, sofern sie sich von der EEG-Umlage befreien lassen können. Für nicht privilegierte Unternehmen liegt wegen der EEG-Umlage der Strompreis fast doppelt so hoch [Wir18].

Stromtarife: Heute und Zukunft

Basierend auf Jahreslastgängen ausgewählter Produktionsprozesse wurden die Angebote verschiedener Energieversorger bzw. Energiemakler im Hinblick auf optionale Tarifvarianten analysiert. Berücksichtigt wurden verschiedene Szenarien des Strombezugs, wie beispielsweise eine Vollversorgung mit Risikozuschlägen, eine Grundversorgung zzgl. Spitzenlast mit flexiblen Strompreis bzw. vollständige Versorgung über einen flexiblen Tarif, bei dem der Strompreis an der Börse nahezu unmittelbar an den Kunden weitergegeben wird.

Die Untersuchung der heutigen Möglichkeiten einer dynamischen Tarifgestaltung für KMU zeigte, dass eine individuelle Strombeschaffung bisher nicht profitabel ist, unabhängig davon, ob von dem Unternehmen selbst oder von einem Stromversorger durchgeführt. Im Vergleich zu dem Verwaltungsaufwand rechtfertigt das mögliche Einsparpotenzial erst ab einer Jahresverbrauchsmenge von über 20 GWh eine individuelle Strombeschaffung am dynamischen EPEX-Spotmarkt.

Allerdings gibt es zunehmend Ansätze, damit auch KMU von den Vorteilen der volatilen Strompreise profitieren können.

So bietet die e.optimum AG die Option des spotmarktbezogenen Einkaufs von elektrischer Energie basierend auf dem Strombedarf einer Einkaufsgemeinschaft bestehend aus meh-

rerer KMU. Dies stellt sicher, dass die beobachteten Preisschwankungen an der Strombörse von KMU genutzt werden können. Somit besteht auch für KMU mit geringer Jahresverbrauchsmenge die Möglichkeit einer dynamischen Tarifgestaltung.

Darüber hinaus wurden weitere aussichtsreiche Tarifmodelle zur dynamischen Strombeschaffung untersucht, die bislang allerdings nicht für den typischen Strombedarf von KMU angeboten werden. Der Tarif TranchenStrom der Stadtwerke Hannover basiert auf historischen Kundenlastgängen und ermöglicht Unternehmen, Teiltranchen monatlich oder quartalsweise festzulegen. Diese Tranchen werden am Terminmarkt vom Energieversorger eingekauft. Das Kaufsignal kann aufgrund eines Indikators oder durch eine Kundenentscheidung ausgelöst werden. Dabei bietet der Tarif verschiedene Flexibilisierungsoptionen wie quartalsweise Kaufentscheidung über Teiltranchen, anteiliger Kauf am Spotmarkt sowie Mengenflexibilität der Teiltranchen. Unter Mengenflexibilität wird dabei die Aufteilung des gesamten Strombedarfs in Monats- oder Quartals-Tranchen (vertikale Aufteilung) oder in unterschiedlich große Quartals-Teiltranchen (horizontale Aufteilung) verstanden. Darüber hinaus bietet die sogenannte „Spotmarkt-Option“ bei einer Abweichung des tatsächlichen Bedarfs von den geplanten Bedarfsmengen einen Ausgleich über den Spotmarkt an.

Bei der Tarifgestaltung müssen die Anforderungen der Produktionsplanung berücksichtigt werden. Anhand der daraus gewonnenen Erkenntnisse konnte eine Analyse verschiedener Ansätze zur Strompreisprognose durchgeführt werden. In Absprache mit den Entwicklern eines Strompreisprognosemodells wurde die Umsetzung der individuellen Anpassung des Prognosemodells ermöglicht.

Strompreisprognose

Die Anforderungen der zu entwickelnden Planungsmethode an eine geeignete Strompreisprognose konnten durch die Betrachtung des Vorgehens der Produktionsprogrammplanung definiert werden.

Die Produktionsprogrammplanung hat ausgehend von einer Absatzprognose die Aufgabe, die mittelfristig erforderlichen Ressourcen zu planen und die herzustellenden Erzeugnisse nach Art, Menge und Termin für einen definierten Planungszeitraum festzulegen. Die spezifische Auslegung von Planungshorizont und Betrachtungstiefe ist in der Praxis abhängig von der jeweiligen Fertigungsstruktur eines Unternehmens. Durchschnittlich kann angenommen werden, dass eine Produktionsprogrammplanung auf Wochenbasis für einen

Zeitraum von 16 Wochen (4 Monaten) monatlich rollierend durchgeführt wird. Der Planungszeitpunkt liegt dabei unmittelbar vor dem Betrachtungszeitraum.

Der am EPEX-Spotmarkt gehandelte Strompreis ist gekennzeichnet durch signifikante Einbrüche zu Zeiten geringerer Nachfrage (vor 8 Uhr, nach 20 Uhr, an Wochenenden und an Feiertagen). Aufgrund der zusätzlichen Kosten für Überschichten und Wochenendarbeit beziehen KMU in der Regel zu diesen Off-Peak-Zeiten nur geringe Mengen Strom. Ein einfacher Wochenmittelwert würde aufgrund der Einbeziehung der nicht genutzten Off-Peak-Preise die Bewertung der einzelnen Perioden für die energiekostenoptimierte Produktionsprogrammplanung verfälschen.

Eine Periode, die für das Unternehmen in Peak-Zeiten günstiger ist als eine andere Periode, könnte durch die Vereinfachung mittels eines wöchentlichen Mittelwerts im Vergleich schlechter bewertet werden (beispielsweise Periode 7 zu Periode 8 in Bild 8). Aus diesem Grund wurde die Anforderung an die Strompreisprognose gestellt, die erwarteten Werte in einem Peak- und einem Off-Peak-Wochenmittelwert zu ermitteln.

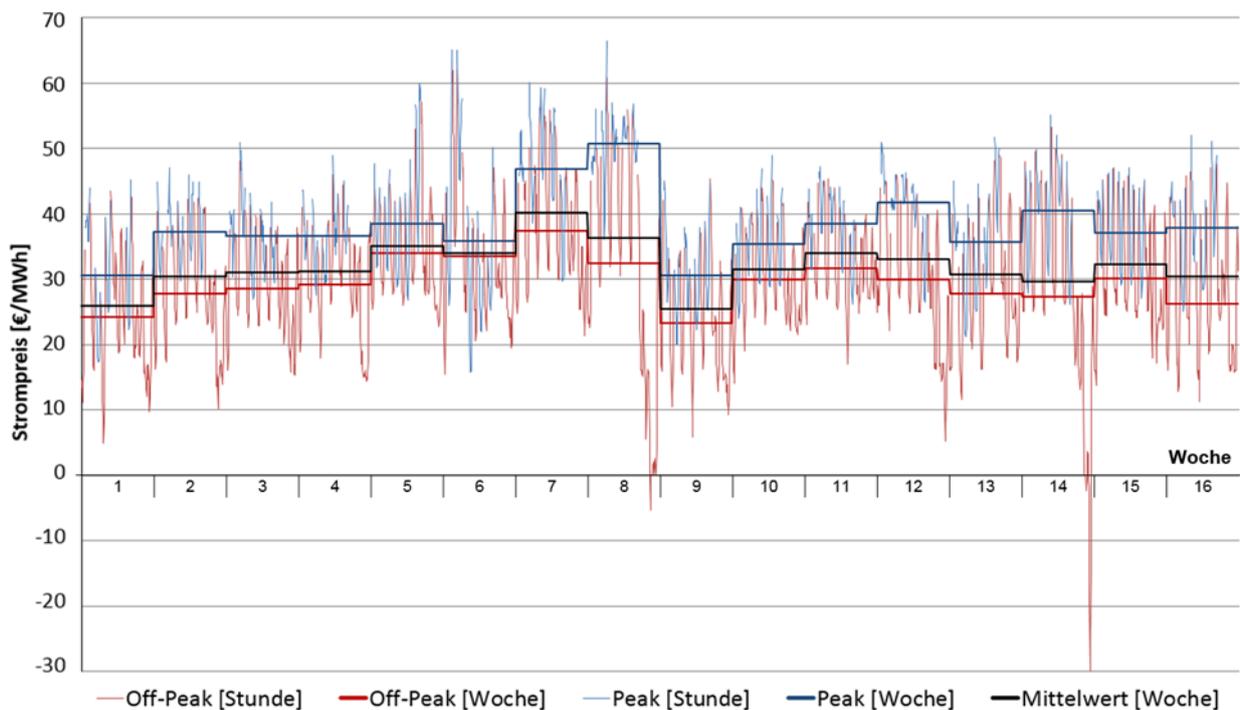


Bild 8 Wöchentlicher Mittelwert nach Aufteilung der Strompreise in Peak- und Off-Peak-Zeiten

Zeitreihenmodelle können den zu erwartenden Strompreis durch eine Kombination von historischen Preisen und früheren Werten von exogenen Faktoren wie der Lastmenge oder Wettervariablen prognostizieren. Dies dient insbesondere kurz- bis mittelfristigen

Prognosen. Aufgrund der Rahmenbedingungen und Anforderungen der Methode zur Produktionsprogrammplanung konnten Zeitreihenmodelle als Grundlage einer geeigneten Strompreisprognose ausgewählt werden.

Wissenschaftler der Europa Universität Viadrina in Frankfurt an der Oder haben ein multivariates Zeitreihenmodell entwickelt. Das initiale Modell ist für einen Prognosehorizont von fünf Tagen ausgelegt. In Zusammenarbeit mit den Wissenschaftlern der Europa Universität Viadrina konnte auf Basis des Lastenheftes ein stufenweises Vorgehen zur Anpassung des Prognosemodells für längere Prognosehorizonte festgelegt werden.

Das angepasste Strompreisprognosemodell erlaubt wöchentliche Strompreisprognosen des EPEX-Spotpreises für Deutschland und Österreich für die jeweils kommenden **vier** Wochen. Unterschieden wird dabei zwischen Peak- und Off-Peak-Wochenpreisen.

3.2 Datenaufnahme und Strukturierung von Arbeitsplänen

Die zu entwickelnde Methode zur Planung kostenoptimaler Produktionsprogramme unter gezielter Nutzung von Lagerbeständen als Speicher von im Produktionsprozess umgesetzter Energie ist vor allem für Unternehmen interessant, die im Produktionsprozess einen hohen Bedarf an elektrische Energie aufweisen. In Bild 9 ist zur Orientierung der Stromverbrauch der energieintensiven Industrien in NRW im Bezugsjahr 2012 gegenübergestellt. Bei der Unternehmensauswahl sind vor allem Unternehmen aus der Metallerzeugung bzw. Metallbearbeitung berücksichtigt worden, da in dieser Branche zahlreiche KMU angesiedelt sind. Der typische elektrische Energiebedarf eines KMU aus dieser Branche beträgt zwischen 1 und 10 GWh/Jahr.

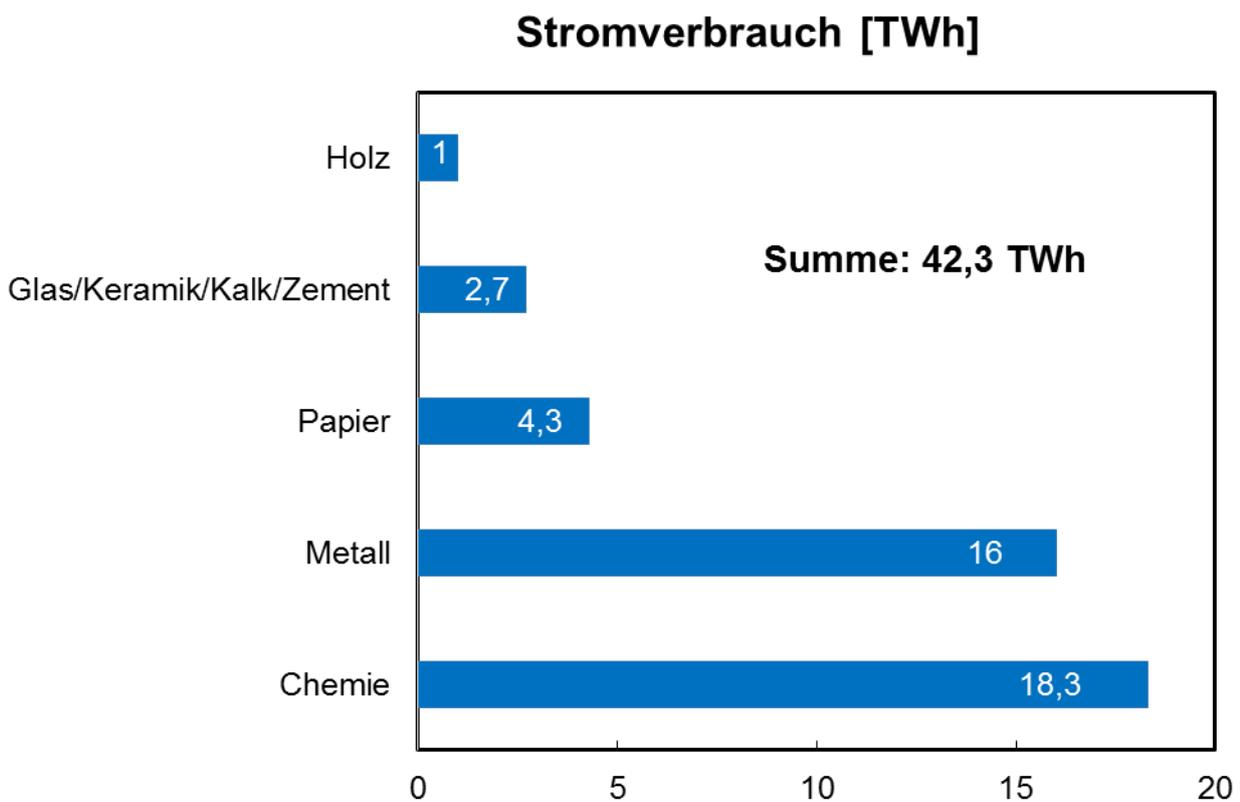


Bild 9 Stromverbrauch der energieintensiven Industrie in NRW im Jahr 2012 [Quelle: „Lastmanagement in Nordrhein-Westfalen - Potenziale, Hemmnisse, Handlungsoptionen“ Studie für die EnergieAgentur.NRW / BET GmbH, Aachen 18.8.2016]

Darüber hinaus ist auch eine hohe Varianz des Strombedarfs in den einzelnen Produkten oder Produktionsschritten notwendig. Je größer die Unterschiede des spezifischen Strombedarfs pro Produktionseinheit in den Produkten sind, umso höher ist auch das Einsparpotenzial. Sofern es die Produktionsprozesse erlauben, kann auch eine Unterbrechung des

Produktionsablaufs und eine Zwischenlagerung der unfertigen Produkte erwogen werden. Für die Methode sind innerbetriebliche Lagerkapazitäten, eine flexible Produktion sowie ein lagerfähiges (Zwischen) Produkt erforderlich. Ein Hemmnis für die Anwendbarkeit der Methode ist beispielsweise eine starke Kopplung des elektrischen und thermischen Energiebedarfs. Für die Wärmeversorgung bestehen dabei häufig Lieferverträge, die die Abnahme einer festgelegten Wärmemenge erfordern. Sofern für die Wärmeversorgung die Prozessabwärme aus dem Unternehmen oder eine Eigenversorgung durch ein BHKW vorgesehen ist, ist die Anwendbarkeit der im Projekt entwickelten Methode nicht überprüft worden. Hier wären weitere Entwicklungsarbeiten notwendig.

Im Folgenden werden für die untersuchten Unternehmen die Produkte, Produktionsverfahren und der charakteristische Strombedarf dargestellt. Darüber hinaus erfolgt eine Darstellung und Bewertung der aufgenommenen Daten.

Metallverarbeitung Drahtseilerei

Hergestellt werden in dem untersuchten Betrieb verschiedene Seile (Förderseile, Brückentragseilen, Ankerseile, Bergeseile, Aufzugseile sowie Bagger- und Kranseile) mit einem Durchmesser zwischen 34 und 160 mm. Die Seillänge können kundenspezifisch mehrere Hundert Meter betragen.

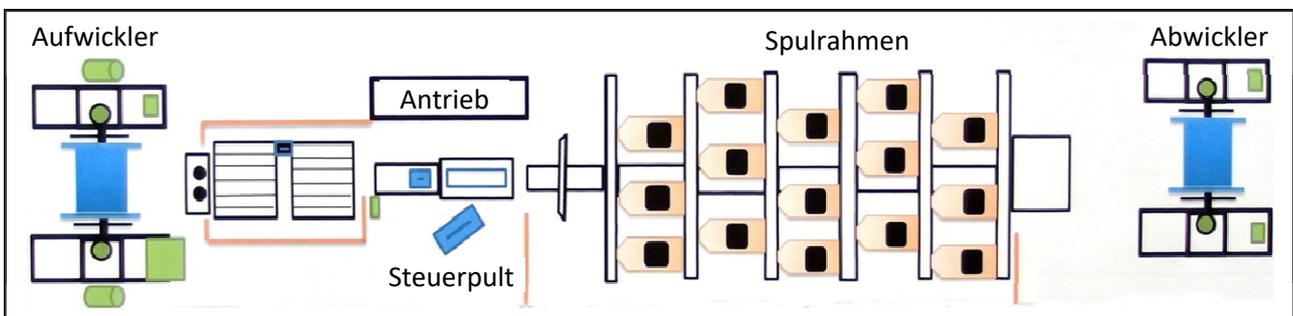


Bild 10 Seilmaschine mit Abwickler, Spulrahmen, Antrieb und Aufwickler (Haspel)

Unterschieden wird zwischen vollverschlossenen Seilen (es wird ausschließlich Profildraht verwendet) und halbverschlossenen Seilen (sowohl Rund- als auch Profildraht). Die beiden Drahtsorten unterscheiden sich hinsichtlich des Strombedarfs signifikant. Einen Einfluss hat neben dem Querschnitt des verwendeten Drahtes (rund bzw. profiliert) auch die Legierung und Vergütung. Die wesentlichen Bestandteile einer Seilmaschine sind in Bild 10 dargestellt. Die unterschiedli-

chen Drähte werden auf Spulen angeliefert. Mehrere Spulen werden in den Spulrahmen der Seilmaschine eingesetzt. Das fertige Seil wird auf einer Haspel aufgewickelt. In

Bild 11 sind das aufgespleißte Ende eines Seils sowie der Spulrahmen einer Seilmaschine zu sehen.

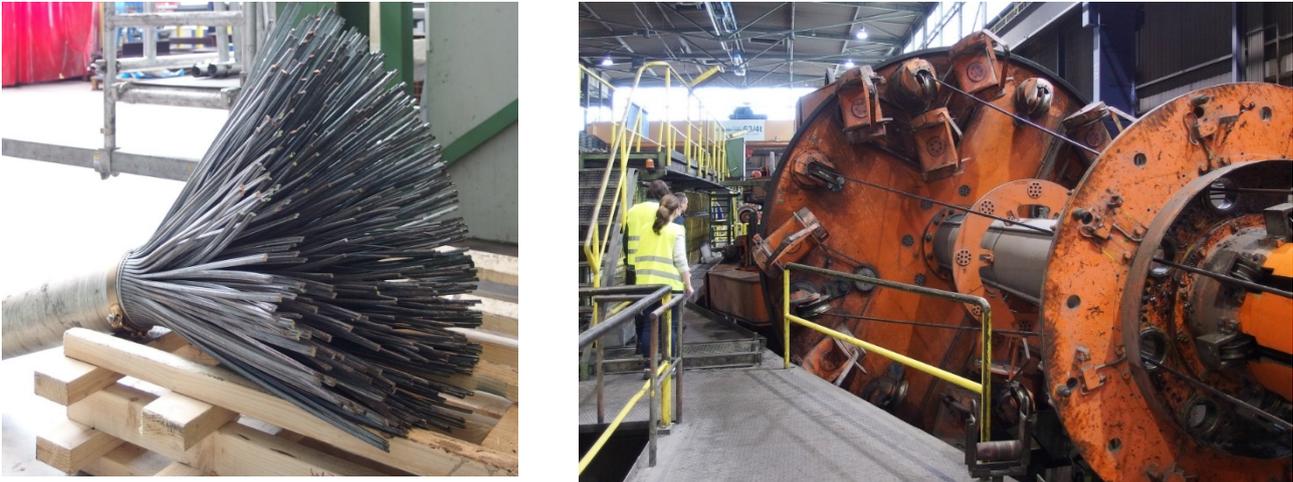


Bild 11 Aufgespleißtes Seilende (links) und Blick auf Spulrahmen einer Seilmaschine vom Aufwickler her (rechts)

Insgesamt werden in dem Betrieb zehn Seilmaschinen sowie ein Extruder für Kunststoffeinlagen im Zweischichtbetrieb betrieben. Im Jahr 2016 wurden 2,2 GWh an elektrischer Energie benötigt. Werden alle Seilmaschinen gleichzeitig gestartet, so kommt es zu einem Leistungspeak. Der Strombedarf einer Seilmaschine hängt von der Maschinendrehzahl und dem Vorschub ab. Diese Parameter werden in Abhängigkeit von den Eigenschaften des eingesetzten Drahtes (Querschnitt, Legierung, Vergütung) eingestellt. Die Maschinendrehzahl der Seilmaschinen beträgt bis zu 1000 min^{-1} . Der Vorschub des Seils lässt sich variieren und beträgt typischerweise 40 bis 60 m/min. Die Maschinen unterscheiden sich hinsichtlich des Durchmessers der produzierten Seile, dem Aufbau und der Möglichkeit, Seile mit einer Seele z. B. aus Kunststoff herzustellen.

Analysiert wurden die Produktionsdaten sowie der Lastgang für eine Seilmaschine über den Zeitraum von 16 Tagen. In dieser Zeit wurden insgesamt vier Produkte mit einer gesamten Seillänge von mehr als 14.000 m hergestellt. Bezogen auf die Produktionsdauer ergab sich die in Bild 12 dargestellte Verteilung. Demnach betrug die Produktionsdauer von Produkt A 9 %, von Produkt B 35 %, von Produkt C 36 % und von Produkt D 20 %.

Produktionsanteil h/h [%]

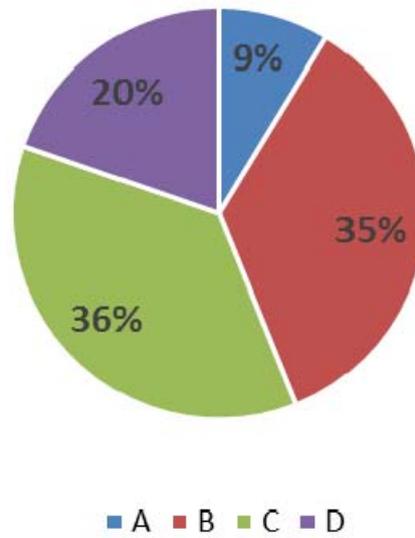


Bild 12 Verteilung der Produkte bezogen auf die Produktionsdauer

In Bild 13 ist der spezifische Strombedarf der vier Produkte bezogen auf den jeweiligen Anteil an der Produktionsdauer dargestellt.

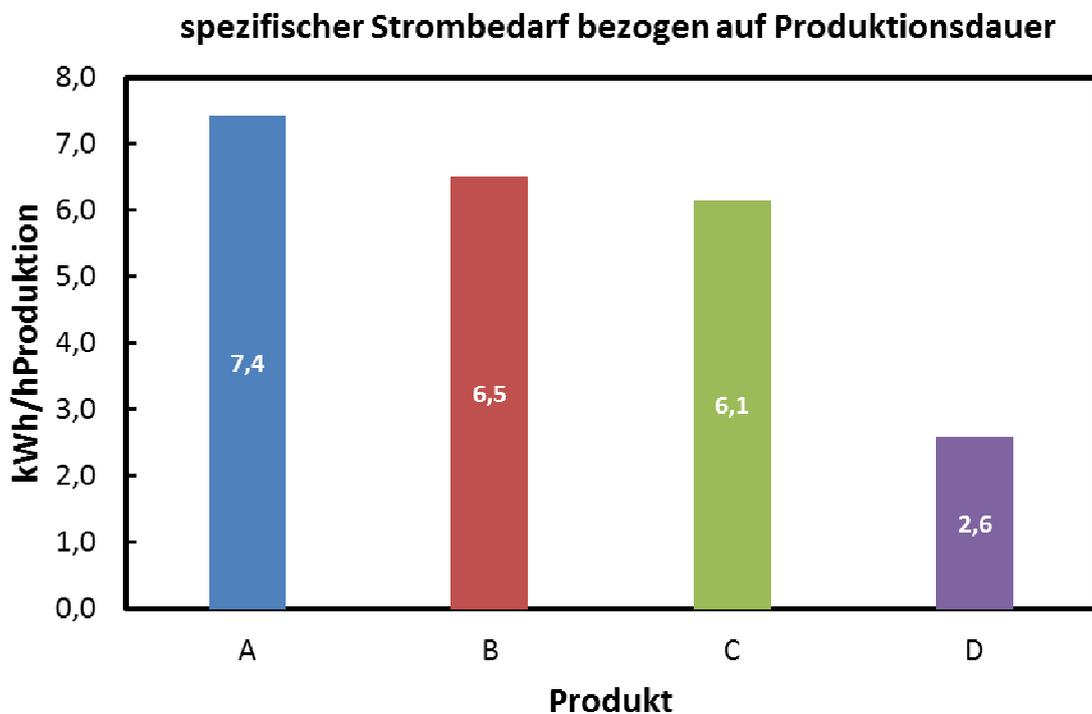


Bild 13 Spezifischer Strombedarf von vier verschiedenen Seilen

In dem Betrieb wurde im betrachteten Zeitraum im Zweischichtbetrieb ohne Wochenenddienst gefertigt. Die untersuchte Seilmaschine war in diesem Zeitraum 186 Stunden im Betrieb, wovon lediglich in 65 Stunden produziert wurden. Die restlichen Zeiten stellen Rüst- und Richtzeiten dar. Der Nutzungsgrad beträgt entsprechend 35 %.

Mit den Angaben in Bild 12 und Bild 13 lässt sich damit die Verteilung des Stromverbrauchs auf die Produkte A bis D ermitteln. Bei einem Gesamtstromverbrauch der Seilmaschine im Untersuchungszeitraum von 371 kWh entfallen auf die Fertigung insgesamt 368 kWh mit einem Anteil von 43 kWh für Produkt A, 148 kWh für Produkt B, 143 kWh für Produkt C und 34 kWh für Produkt D. In den Rüst- und Richtzeiten beträgt der Stromverbrauch 3 kWh.

Unter Berücksichtigung der produzierten Seillänge ergeben sich für den spezifischen Strombedarf der vier Produkte für die Produkte A bis C nur geringe Unterschiede (26, 26 und 25 kWh/km Seil). Damit ist auch das Einsparpotenzial durch eine Produktionsverlagerung gering. Hingegen weist das Produkt D einen spezifischen Strombedarf von 42 kWh/km Seil auf, so dass die Produktion möglichst in Zeiten mit niedrigen Strompreisen erfolgen sollte.

Das betrachtete Unternehmen weist für die Anwendbarkeit der zu entwickelnden Methode grundsätzlich die notwendige Kapazitätsflexibilität auf. Allerdings erfolgt die Produktion auf kurzfristige Kundenanfragen hin. Dabei ist die jeweilige Spezifikation kundenspezifisch, so dass eine Produktion ins Lager nur mit Einschränkungen möglich ist.

Metallverarbeitung Kleinserien

Das untersuchte Unternehmen ist der Branche Metallverarbeitung zuzuordnen und stellt in mehrstufigen Fertigungsprozessen Kleinserien von verfahrenstechnischen Apparaten her. Aufgenommen wurde der Strombedarf während des fünfstufigen Produktionsprozesses eines Pumpengehäuses. Es werden Kleinserien von ca. 50 Stück gefertigt; aufgrund der Rüstzeiten ist die Lastaufnahme bei den ersten Gehäusen einer Serie atypisch.

Die Fertigung des Pumpengehäuses erfolgt unter Verwendung verschiedener CNC-Drehmaschinen, einem horizontalen Bearbeitungszentrum und einer konventionellen Drehmaschine (siehe Bild 14).

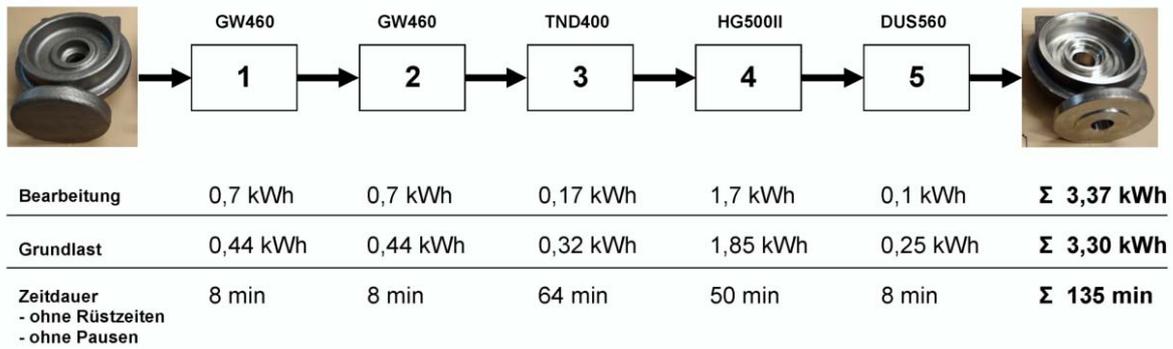


Bild 14 Darstellung des Produktionsprozesses und des Strombedarfs der Prozessschritte an den entsprechenden Maschinen

Insgesamt zeichnet sich der Produktionsprozess durch einen relativ geringen Strombedarf auf. Dabei dominiert die Grundlast, die auch im Leerlauf der Produktionsmaschinen aufgezeichnet wurde. Exemplarisch ist der zeitliche Verlauf der aufgenommenen Last für den Produktionsschritt 2 in Bild 15 dargestellt:

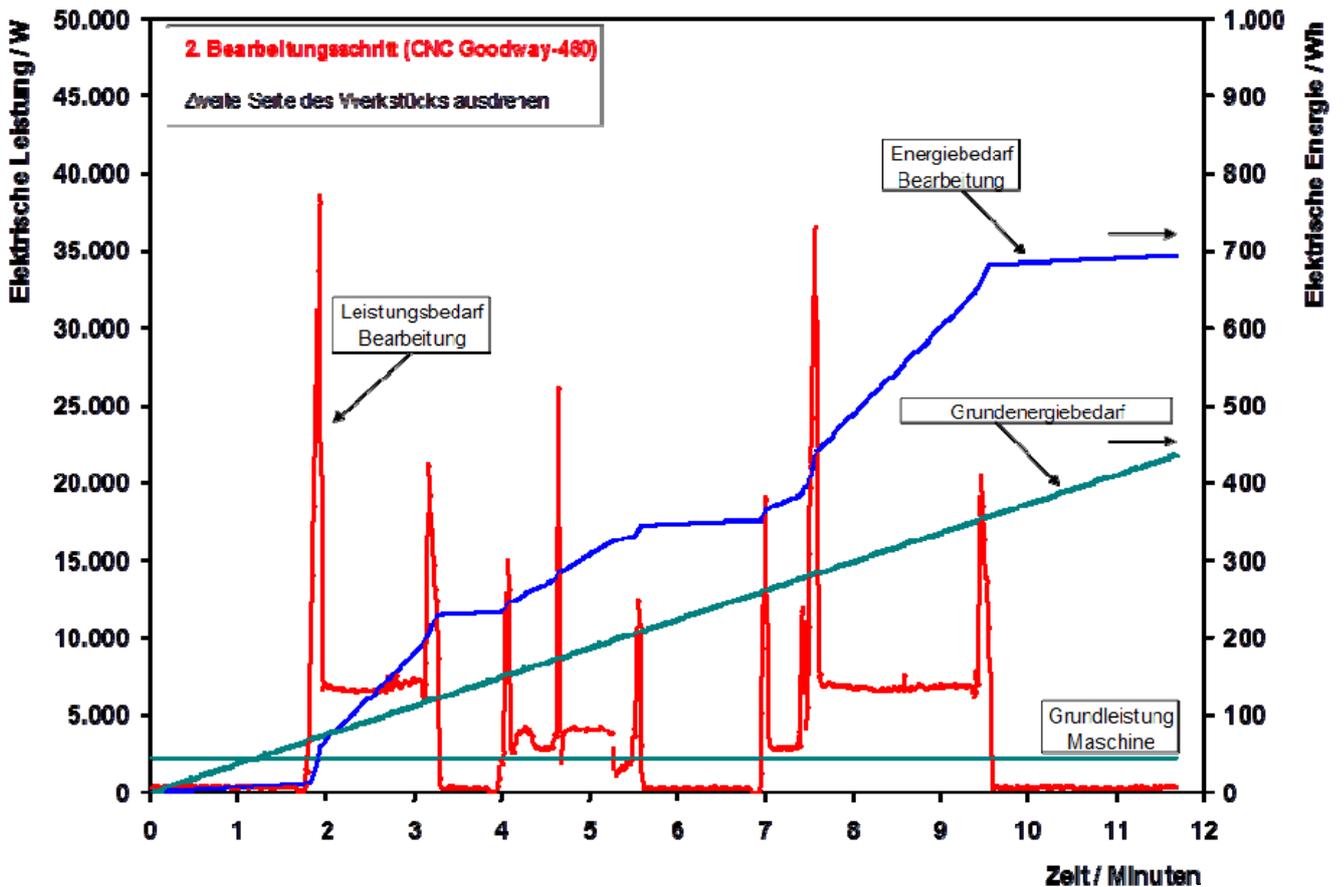


Bild 15 Lastgang und Energiebedarf während des 2. Bearbeitungsschrittes

Aufgrund des geringen spezifischen Strombedarfs, der den Produkten bzw. Produktionsschritten zugeordnet werden kann, ergibt sich durch die Anwendung der Methode zur Planung von Produktionsprogrammen unter Nutzung von Lagerbeständen als Stromspeicher kein relevantes Einsparpotenzial.

Metallbearbeitung Kupferlackdraht

Bei einem Hersteller von Kupferlackdraht wurde der Produktionsprozess untersucht und ermittelt, ob dieses der Branche der Metallbearbeitung zuzurechnende Unternehmen für die Anwendung der Methode zur Planung von energieoptimierten Produktionsprogrammen geeignet ist.

Bei der Herstellung von Kupferlackdraht (Bild 16) wird ein elektrisch leitender Kupferdraht in einem abschließenden Arbeitsschritt mit einer elektrisch isolierenden Lackschicht überzogen. Kupferlackdraht wird zur Herstellung von elektrischen Spulen, Transformatoren oder elektrischen Maschinen verwendet.

Der Produktionsprozess besteht aus einem mehrstufigen Ziehprozess von Kupferdraht auf den gewünschten Durchmesser. Ein grober Draht wird ohne Erwärmung durch eine sich verjüngende Öffnung gezogen. Diese Öffnung wird oft durch ein Walzengerüst gebildet. Der Kupferdraht wird im Grobzug von einem ursprünglichen Durchmesser von ca. 8 mm auf unterschiedliche Drahtstärken von 2,7 bis 6,7 mm gezogen. Drahtziehen ist ein mechanischer Produktionsprozess, bei dem es zu keinen Materialverlusten kommt. Der Kupferdraht wird also im Verarbeitungsprozess proportional zur Querschnittreduktion länger. Der elektrische Energiebedarf bei der Herstellung der unterschiedlichen Kupferdrähte hängt unmittelbar von der erreichten Querschnittsverjüngung ab. Im nachgelagerten Produktionsschritt erfolgt eine weitere Verjüngung des Kupferdrahtes, wobei unmittelbar auch die Beschichtung mit Drahtlacken z. B. auf Basis von Polymeren erfolgt.



Bild 16 Produkte (oben) und Produktionsprozess (unten) bei der Kupferlackdrahtherstellung

Das untersuchte Unternehmen weist eine hohe Variantenanzahl an Produkten mit signifikant unterschiedlichen Strombedarfen auf. Allerdings besteht nur eine geringe Kapazitätsflexibilität, so dass die Leistung, mit der Aufträge abgearbeitet werden können, nur in einem geringen Umfang variiert werden kann. Zurückzuführen ist dies auf die bereits jetzt hohe Anlagenauslastung.

Papierindustrie

Die Produktion der Papierindustrie wird üblicherweise in folgende Gruppen (sog. Hauptsorten) eingeteilt:

- Papier, Karton und Pappe für Verpackungszwecke
- Grafische Papiere
- Hygienepapiere
- Papier und Pappe für technische und spezielle Verwendungszwecke.

Die Produktionsmenge der deutschen Papierindustrie betrug in 2017 23 Mt. Grafische Papiere sowie Verpackungspapiere stellen mit 35,6 % bzw. 51,5 % die mit Abstand größten Anteile der Gesamtproduktion, es folgen Hygienepapiere und Technische Papiere mit 6,6 % bzw. 6,3 % (www.vdp-online.de).

Wie in Bild 9 dargestellt, zählt die Papierindustrie zu den energieintensiven Industrien. Dabei weist die Papierindustrie sowohl einen hohen Bedarf an elektrischer als auch thermischer Energie auf. Aus diesem Grund ist in dieser Branche mit mehr als 70 % der Betriebe der Anteil an Eigenversorgern mit Kraft-Wärme-Kopplungsanlage z. B. in Blockheizkraftwerken (BHKW) besonders hoch. Der Energiekostenanteil beträgt ca. 12 Prozent der Herstellungskosten, so dass dem Produktionsfaktor Energie in der Papier- und Zellstoffindustrie aufgrund der hohen Energieintensität des Herstellungsprozesses große Bedeutung zukommt.

Die Produktionsprozesse in der Papierindustrie unterteilen sich im Wesentlichen in den Rohstoffaufschluss, die Stoffaufbereitung und die eigentliche Papiermaschine. Betrachtet wurde im Rahmen der Datenaufnahme eine Papiermaschine zur Herstellung grafischer Papiere, wie sie in Bild 17 schematisch dargestellt ist. Unter grafischen Papieren werden dabei Papiere für Zeitungen, Zeitschriften, Bücher sowie Brief- bzw. Druckerpapiere verstanden.

Am Stoffauflauf wird die Faserstoffsuspension auf ein umlaufendes Sieb gegeben. Die Faserstoffsuspension setzt sich zu mehr als 99 % aus Wasser sowie aus Altpapier-, Zell- oder Holzstoff und Additiven zusammen. Für die mechanische Entwässerung in Sieb- und Pressenpartie sowie die Antriebe der Papiermaschine ist elektrische Energie erforderlich. Im Verlauf des Produktionsprozesses von Rohpapier werden nacheinander die Sieb-, die Pressen- sowie die Trockenpartie durchlaufen. Als Wärmequelle für die Trockenpartie

dient in der Regel in einem Kessel oder BHKW erzeugter Dampf. Im Falle von gestrichenen Papieren schließen sich an die Trockenpartie Strichauftrag und -trocknung an.

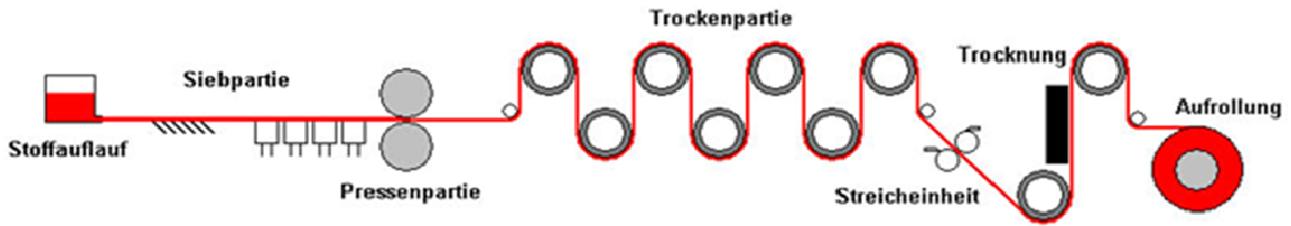


Bild 17 Schema einer Papiermaschine mit Streicheinheit

Die untersuchte Papierfabrik stellt auf einer Papiermaschine im Untersuchungszeitraum (72 h) neun unterschiedliche Papiersorten her. Diese unterscheiden sich vor allem im Flächengewicht (47 bis 111 g/m²). Der Strombedarf wird einerseits von den Entwässerungseigenschaften der jeweiligen Faserstoffsuspension in der Sieb- und Pressenpartie der Papiermaschine beeinflusst (Bild 18). Maßgeblichen Einfluss hat auch die Maschinengeschwindigkeit der Papiermaschine (355 bis 1.000 m/min).

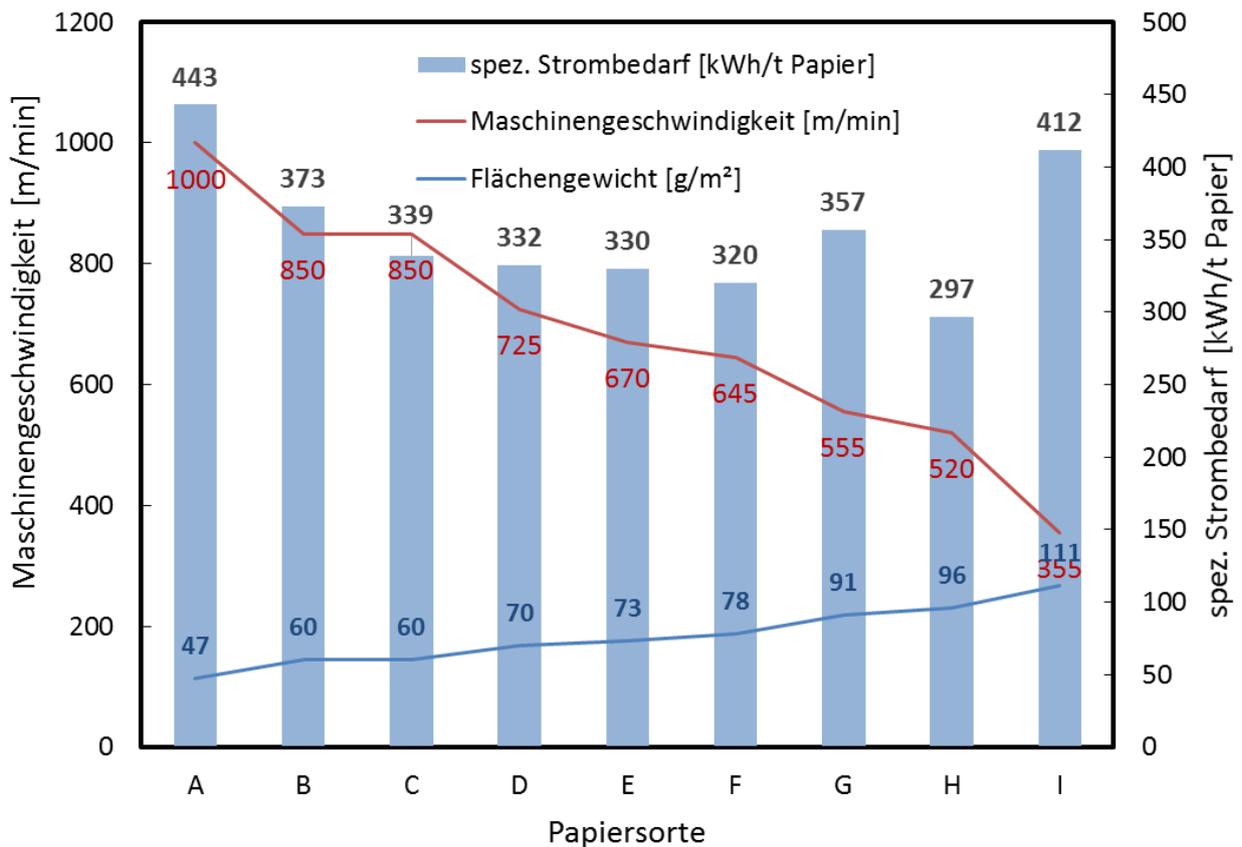


Bild 18 Spezifischer Strombedarf verschiedener grafischer Papiere und Einflussfaktoren

Erkennbar weisen die verschiedenen Papiersorten signifikante Unterschiede im spezifischen Strombedarf auf (297 bis 443 kWh/t Papier). Unter Berücksichtigung der Sortenverteilung (

Bild 19) lässt sich damit ein hohes Einsparpotenzial durch die Anwendung von Produktionsprogrammen unter Nutzung von Lagerbeständen als Stromspeicher abschätzen.

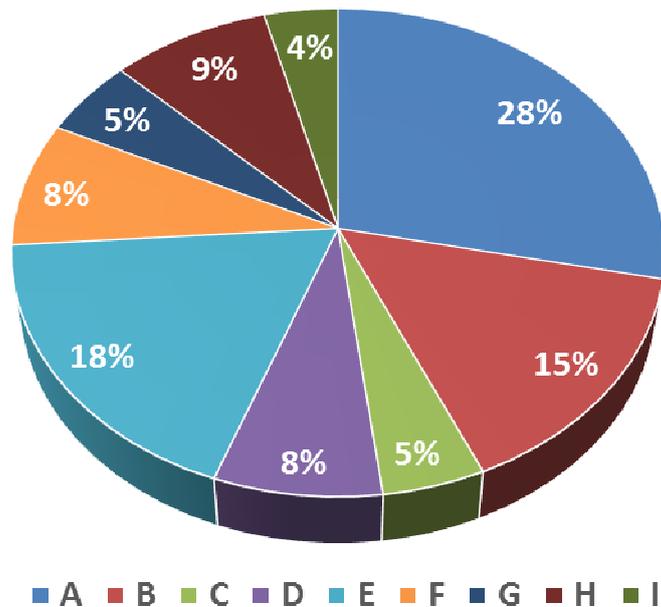


Bild 19 Sortenanteil verschiedener grafischer Papiere

Allerdings wird für die Trockenpartie sowie weitere Betriebsteile (Stoffaufschluss und Stoffaufbereitung) überwiegend thermische Energie benötigt. Typischerweise erfolgt die Energieversorgung in betriebseigenen, wärmegeführten BHKWs, wobei häufig Lieferverträge zur Wärmeversorgung mit internen oder externen Verbrauchern bestehen. Darüber hinaus werden Papiermaschinen mit einer hohen Auslastung von mehr als 8.400 h/anno betrieben. Es handelt sich um einen kontinuierlichen Prozess. Die der Papiermaschine am Stoffauflauf aufgegebene Faserstoffsuspension wird in der Regel in der Papierfabrik in der Stoffaufbereitung, die ihrerseits einen hohen Strombedarf hat, hergestellt. Im sogenannten Konstanten Teil wird anschließend die gewünschte Stoffdichte eingestellt, bevor die Faserstoffsuspension am Stoffauflauf auf die Papiermaschine aufgegeben wird. Der Produktionsprozess weist daher grundsätzlich nur eine geringe Kapazitätsflexibilität auf. Der Produktwechsel erfolgt durch die Beschickung des Stoffauflaufs durch eine neue Bütte, in der die vorbereitete Faserstoffsuspension zwischengelagert wird. Da die zu entwickelnde Methode zur Nutzung von Lagerbeständen als Stromspeicher der Produktionsprogrammpla-

nung mit einem Planungshorizont von ein bis vier Wochen zuzuordnen ist, erscheint sie für die Papierindustrie wenig anwendungsrelevant.

Über die oben beschriebenen Branchen hinaus, an deren spezifischen Gegebenheiten die Anwendungsgrenzen der zu entwickelnden Methode zur Planung von Produktionsprogrammen unter Nutzung von Lagerbeständen als Stromspeicher dargestellt wurden, standen Jahreslastgänge aus Unternehmen der Metallverarbeitung sowie der Kunststoffindustrie für die Validierung des Optimierungsmodells zur Verfügung.

Strukturierung von Arbeitsplänen

Die Strukturierung von Arbeitsplänen zur Verringerung der Modellkomplexität kann anhand von logistischen und energetischen Faktoren durchgeführt werden. Aufgrund des hohen Aufwands der Aufnahme der spezifischen Energieverbräuche einzelner Produkte innerhalb eines Produktionsbereiches wird in einem ersten Verfahren vorab eine logistische Eingrenzung der zu betrachtenden Bereiche vorgenommen. Für die Produkte der identifizierten Bereiche werden daraufhin die notwendigen Energieverbräuche bestimmt, welche die Bildung von energetischen Produktklassen ermöglichen.

Das Verfahren zur logistischen Eingrenzung der zu betrachtenden Produktionsbereiche ist wie in Bild 20 dargestellt in vier Schritte eingeteilt.

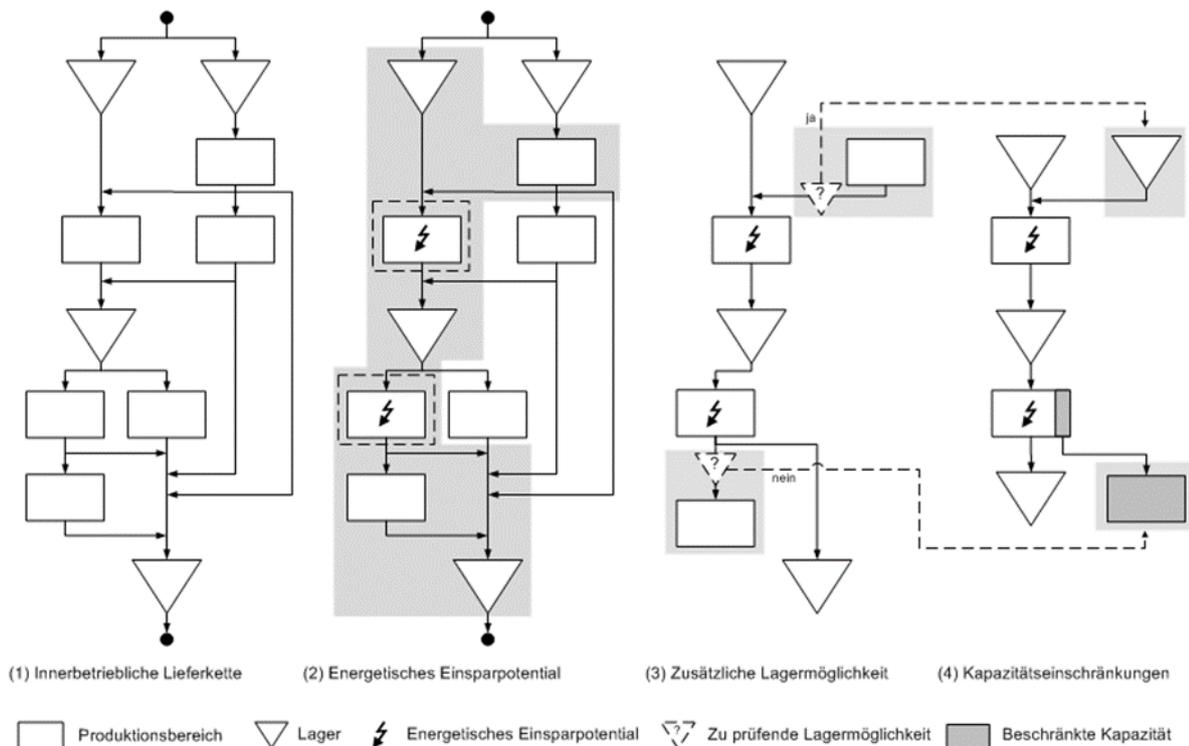


Bild 20 Schritte des Verfahrens zur Eingrenzung der zu betrachtenden Produktionsbereiche

Zu Beginn des Verfahrens zur Eingrenzung der zu betrachtenden Produktionsbereiche wird in Schritt 1 die gesamte innerbetriebliche logistische Lieferkette des Unternehmens aufgenommen. Die wesentlichen Elemente einer logistischen Lieferkette sind Produktionsbereiche (Fertigung und Montage als Orte der Wertschöpfung) sowie Lager (zur zeitlichen und mengenmäßigen Entkopplung einzelner Produktionsbereiche). Die aufgeführten Materialflüsse geben dabei Aufschluss über die Zusammenhänge zwischen den Elementen.

In Schritt 2 werden Produktionsbereiche mit einem hohen energetischen Einsparpotential identifiziert. Das energetische Einsparpotential kann in diesem Schritt durch den Vergleich der bereichsspezifischen Energieverbrauchsmengen bestimmt werden. Sollten keine aufgeschlüsselten Energieverbrauchsmengen für die verschiedenen Bereiche vorliegen kann über eine synthetische Betrachtung der entsprechenden Maschinenleistung und der vorhandenen Kapazität eine relative Verbrauchsmenge ermittelt werden. Im Vergleich können so die Bereiche mit dem höchsten energetischen Einsparpotential identifiziert werden. Zur Aufwandsreduzierung werden ausschließlich die identifizierten Bereiche mittels eines energiekostenoptimierten Produktionsprogramms geplant, wodurch die Betrachtung auf das direkte Umfeld der entsprechenden Produktionsbereiche eingegrenzt werden kann.

Die energiekostenorientierte Planung eines Produktionsbereichs ist abhängig von der Flexibilität der angrenzenden logistischen Elemente. Ein Produktionsbereich lässt sich durch eine vorhergehende oder nachfolgende Lagerhaltung von den umliegenden Produktionsbereichen entkoppeln (vgl. links in

Bild 21).

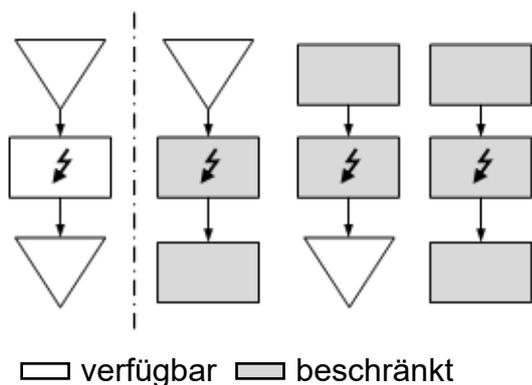


Bild 21 Beschränkung der verfügbaren Kapazitäten durch angrenzende Produktionsbereiche

Vor- oder nachgelagerte Produktionsprozesse beschränken durch die fehlende Entkopplung die Planungsfreiheit des zu optimierenden Bereiches. Dies stammt daher, dass eine zeitliche oder mengenmäßige Anpassung der jeweiligen Bedarfe für den Produktionsbereich direkte Auswirkungen auf angrenzende Bereiche hat (vgl. rechts in

Bild 21). Diese werden hingegen nicht in der Optimierung betrachtet und daher wird die Annahme getroffen, dass nicht entkoppelte angrenzende Bereiche die Produktionskapazität um den geteilten Anteil der Produktionsmenge beschränken. Aus diesem Grund wird in Schritt 3 geprüft, ob zusätzliche Lagermöglichkeiten zwischen angrenzenden Bereichen bestehen. Ob ein zusätzliches Lager eingeführt werden kann, hängt von fertigungstechnischen und organisatorischen Faktoren (beispielsweise sich notwendigerweise direkt anschließenden Bearbeitungsschritten oder automatisierten Fördereinrichtungen) ab. Wenn ein zusätzliches Lager eingeführt werden kann, wird anstelle des angrenzenden Produktionsbereichs nur noch das neu geschaffene Lager betrachtet (vgl. Bild 20, Schritt 3 zu 4, oben). Kann kein Lager eingeführt werden, bleibt der angrenzende Produktionsbereich bestehen (vgl. Bild 20, Schritt 3 zu 4, unten).

Bei weiterhin bestehenden Verbindungen zwischen zwei Produktionsbereichen muss in Schritt 4 die Beschränkung der Kapazitäten anhand von durchschnittlichen Produktionsmengen gekennzeichnet werden. Diese Anteile der Kapazität finden aufgrund der fehlenden Entkopplung keine Beachtung bei der energiekostenorientierten Optimierung. Abhängig von der unternehmensspezifischen Situation muss entschieden werden, bis zu welchem Anteil der eingeflossenen Kapazitätsbeschränkungen ein Produktionsbereich weiterhin für die verbleibenden Kapazitätsanteile energiekostenoptimiert geplant werden soll. In Folge können Produktionsbereiche mit hohen Kapazitätsbeschränkungen komplett von der Optimierung ausgeschlossen werden. Mit Hilfe der aufgeführten Schritte konnte so eine erste organisatorische Vereinfachung und Zusammenfassung der innerbetrieblichen Lieferkette zur anwendungsorientierten Nutzung für die zu entwickelnde Planungsmethode vorgenommen werden.

Für die zu betrachtenden Produktionsbereiche müssen zusätzliche relevante Parameter für die Auslegung der Produktionsplanungsmethode aufgenommen werden. Dazu zählen Kosten für den Kapazitätsaufbau oder -abbau aller Lager und Produktionsbereiche oder die Grenzen der jeweiligen Kapazitätsflexibilitäten. Aufgrund der verringerten Modellkomplexität durch Anwendung der Strukturierungssystematik konnte der Aufwand für die entsprechende Datenaufnahme erheblich verringert werden.

3.3 Analyse der Rahmenbedingungen für ein Optimierungsmodell

Die notwendigen Rahmenbedingungen für die Anwendbarkeit des Optimierungsmodells wurden in Expertengesprächen mit Vertretern von produzierenden Unternehmen, mit den Mitgliedern des PA aber auch mit Vertretern von Energiedienstleistern ermittelt.

Zur erfolgreichen Anwendung der Produktionsprogrammplanungsmethode gilt es, wie in Bild 22 dargestellt, sowohl energiewirtschaftliche als auch produktionslogistische Voraussetzungen zu erfüllen.

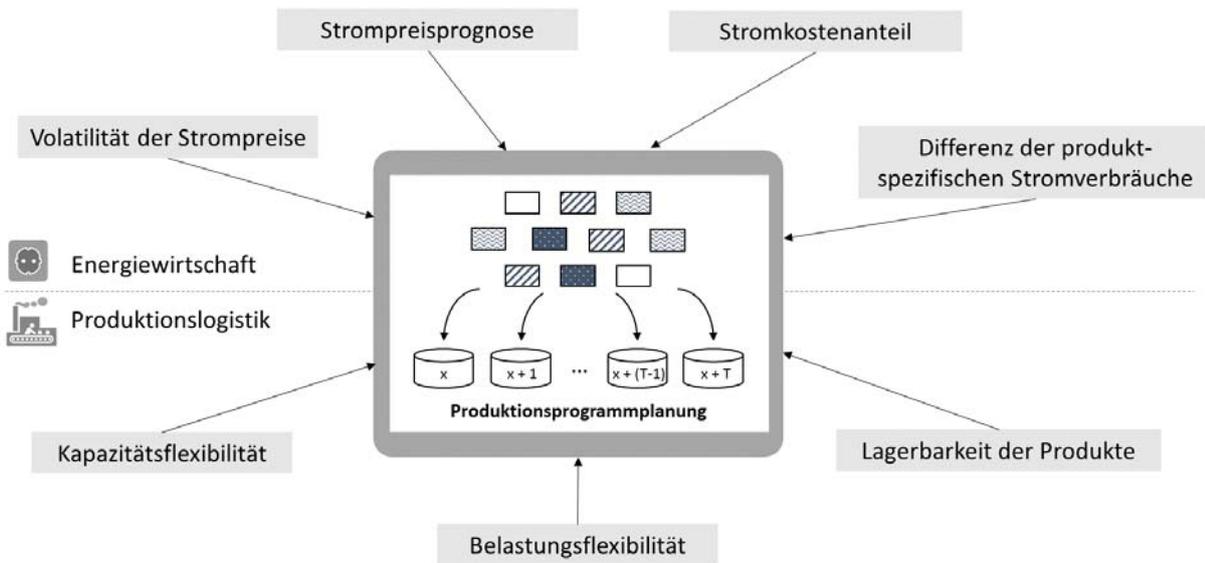


Bild 22 Erfolgsfaktoren für energiekostenoptimierte Produktionsprogramme

Energiewirtschaftliche Voraussetzungen

Für eine erfolgreiche Anwendung der Methode ist es notwendig, die Strompreise mit ausreichender Genauigkeit für einige Wochen vorherzusagen. Dies wurde im Rahmen des Projektes durch ein angepasstes Strompreisprognosemodell realisiert, welches wöchentliche Strompreisprognosen des EPEX-Spotpreises für Deutschland und Österreich für die jeweils kommenden vier Wochen anfertigt (vgl. Kap. 3.1).

Die Methode ist für Unternehmen interessant, bei denen produktionsbedingt ein hoher Strombedarf besteht. Dabei sollten sich einzelne Produktionsschritte und Produkte signifikant in ihrem spezifischen Strombedarf unterscheiden. Eine Abschätzung des Einsparpotenzials der Energiekosten durch eine Anpassung der Produktion konnte beispielhaft anhand von Daten der Produktion zweier Produkte mit unterschiedlichem Strombedarf vorgenommen werden.

Dazu wurde der Jahresstromverbrauch der Produktion mit 5 GWh sowie der spezifische Verbrauch für Produkt A mit 200 kWh pro Stück und für Produkt B mit 425 kWh pro Stück angenommen. Die Produktionskapazitäten werden zu gleichen Teilen von beiden Produkten beansprucht. In der Rechnung wurden die erzielten Stundenkontrakte der Day Ahead EPEX Strombörse aus 2015 betrachtet, wobei Preise zu Off-Peak Stunden (zwischen 21 und 8 Uhr) und Wochenendzeiten für ein realistischeres Abbild der Situation von mittelständischen Unternehmen ausgeschlossen wurden. Ohne Energiekostenoptimierung ergeben sich über den errechneten Jahresmittelwert von 39,64 Euro/MWh jährliche Stromkosten von 198.200 Euro. Würde nun durch eine energiekostenoptimierte Produktionsprogrammplanung in dem Viertel der Stunden, in denen der Preis besonders hoch ist, ausschließlich Produkt A (mit einem geringen Stromverbrauch) und in dem Viertel der Stunden, in denen der Preis besonders gering ist, ausschließlich Produkt B (mit einem hohen Stromverbrauch) gefertigt, ergäben sich jährliche Stromkosten von 159.931 Euro. Diese beispielhafte Abschätzung zeigt, dass für einen einfachen Anwendungsfall ein Einsparpotenzial der Energiekosten von 19,3 Prozent vorliegt. In der vereinfachten Beispielrechnung wurden ausschließlich Stromkosten berücksichtigt; notwendige Logistikkosten durch die zusätzliche Lagerhaltung sowie eine mögliche Kapazitätserhöhung (zum Beispiel durch Überstunden) in Phasen günstiger Strompreise wurden nicht untersucht.

Zur Hebung des Einsparpotenzials ist es notwendig, dass das Unternehmen Zugang zu einem Stromtarif hat, der die Volatilität des Strompreises abbildet. Auf dem Markt sind bereits verschiedene Tarifmodelle zur dynamischen Strombeschaffung im Angebot. Der Strom wird dabei hauptsächlich am Spotmarkt und zu einem geringen Anteil auch am Terminmarkt bezogen.

Produktionslogistische Voraussetzungen

Auch von Seiten der Produktionslogistik müssen Voraussetzungen für die erfolgreiche Anwendung der Methode zur energiekostenoptimierten Produktionsprogrammplanung erfüllt werden. Ein wichtiger Aspekt ist die Lagerbarkeit der Produkte. Nach dem zu planenden Produktionsschritt müssen die Produkte entkoppelt werden, sodass Halbzeuge eingelagert und die Produktherstellung in einer späteren Periode fortgesetzt werden kann. Vorhandene Lager oder Puffer, ohnehin geplante Transporte oder automatisierte Fördereinrichtungen zwischen zwei Arbeitssystemen haben Einfluss auf die Lagerbarkeit der Produkte. Die durch die Lagerung anfallenden Logistikkosten stehen dabei den Energiekostensparnissen gegenüber. Die Minimierungsziele der Energiekosten und der Lagerhal-

tungskosten sowie sonstiger Kosten (beispielsweise Zuschläge für Überstunden und Wochenendarbeit) verhalten sich gegensätzlich und müssen bei der abschließenden Bewertung der Methode und ihrer Einsetzbarkeit in Unternehmen unterschiedlicher Branchen berücksichtigt werden.

Eine Anwendung der Methode kann des Weiteren nur erfolgen, wenn der zu planende Produktionsbereich über Kapazitäts- und Belastungsflexibilitäten verfügt. Die Kapazitätsflexibilität beschreibt die Fähigkeit eines Systems, die Leistung, mit der Aufträge abgearbeitet werden, anzupassen. Dies kann sowohl über die Arbeitskräfte (bspw. durch Überstundenaufbau/-abbau, zusätzliche Schichten, Wochenendarbeit) als auch über die Betriebsmittel (bspw. durch Nutzung/Stilllegung von Anlagen, Veränderung der Betriebsmittelintensität) erreicht werden. Die Belastungsflexibilität charakterisiert die Anpassungsfähigkeit der zeitlichen und mengenmäßigen Einlastung von Arbeitsaufträgen. Ein zeitlicher Ausgleich der Belastung kann beispielsweise durch das Vorziehen oder Aufschieben von Produktbedarfen realisiert werden. Je flexibler ein Unternehmen hinsichtlich dieser Aspekte ist, umso besser kann es auf Schwankungen der Stromverfügbarkeit schon während der Produktionsprogrammplanung reagieren.

Zielgrößen und betriebliche Restriktionen

Die Voraussetzungen zur erfolgreichen Anwendung einer Methode zur energiekostenorientierten Produktionsprogrammplanung zur Nutzung von Lagerbestand als Energiespeicher birgt bereits die wichtigsten Kostenfaktoren für eine Optimierung.

Die Haupttreiber der Zielgrößen des Systems konnten, wie in Bild 23 in Form von Piktogrammen dargestellt, als Energie, Produktion, Lager und Kunden identifiziert werden.

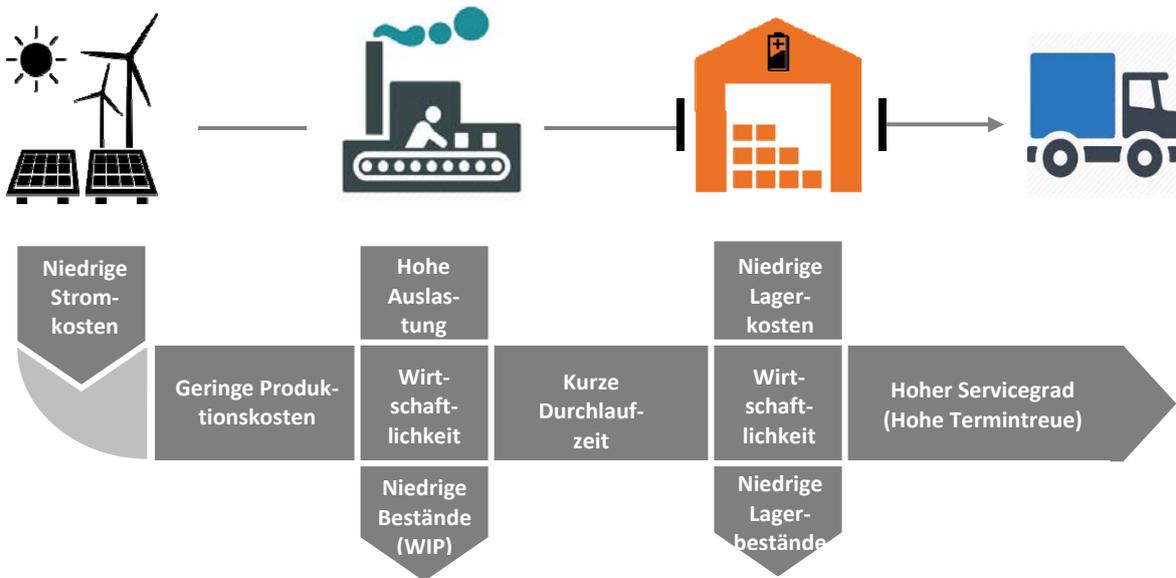


Bild 23 Grundlegende Zielgrößen der Nutzung von Lagerbestand als Energiespeicher

Die Zielgrößen der Produktion und des Lagers ergeben sich aus den logistischen Kosten und der logistischen Leistung. Zusätzlich wirkt sich das Ziel der niedrigen Stromkosten auf die Produktionskosten aus. Bisherige Ansätze der Verbrauchsanpassung zur Energiekostenreduktion in der Produktion weisen extrem begrenzte Flexibilität auf. Dies lag bisweilen an der Notwendigkeit der Erreichung einer hohen Termintreue. Durch den Aufbau von Lagerbestand kann nun der Kundenbedarf zeitlich und mengenmäßig von der Produktion getrennt werden. In der Produktionsprogrammplanung gehen wir weiter davon aus, dass die Kapazitäten so geplant werden, dass der prognostizierte Kundenbedarf gedeckt werden kann. Käme es zu einem Defizit an Produktionskapazitäten würden diese entweder im Vorfeld gesteigert oder Produktionsmengen extern vergeben werden. Aus diesen Gründen muss die Termintreue nicht als Zielgröße des Optimierungsmodells aufgenommen werden.

Im Wesentlichen bestehen so die monetären Zielgrößen der energiekostenoptimierten Produktionsprogrammplanung aus Energiekosten, Lagerkosten, Kosten für Kapazitätsflexibilisierungen und Auftragswechselkosten.

Die Zusammensetzung und Prognose der Energiekosten ist ein zentraler Aspekt des Forschungsprojektes und wurde daher schon wie in Abschnitt 3.1 beschrieben gesondert betrachtet. Aus den identifizierten Stromkosten ergeben sich keine weiteren Nebenbedingungen für das Optimierungsmodell.

Für die Abwägung, ob die Erhöhung der Fertigung bei günstigen Strompreisen genug Einsparung mit sich bringt, um die entstehenden Mehrkosten für die Lagerung der Produkte aufzuwiegen, mussten die durch die Lagerung der Zwischenprodukte entstehenden Kosten quantifiziert werden. Die Lagerkosten werden zumeist mit Hilfe des Lagerhaltungskostensatzes ausgedrückt. Dieser gibt das Verhältnis zwischen dem Wert der eingelagerten Güter und den für die Einlagerung entstehenden Kosten in Prozent an. Die Berechnung des Lagerhaltungskostensatzes erfolgt für jedes Unternehmen individuell anhand des Verhältnisses der entstandenen Kosten und Produktionswerte innerhalb eines Betrachtungszeitraums. Die Lagerkosten setzen sich aus den folgenden Kostenpunkten zusammen:

- Personalkosten für den Betrieb des Lagers, wie Löhne und Gehälter
- Kosten für die Lagerräume (Abschreibungen für möglichen Wertverlust der Lageranlagen, Miete, Verzinsung internen Kapitals, Instandhaltungskosten, Heizung, Strom, Wasser)
- Kosten für die gelagerten Waren (Verzinsung des gebundenen Kapitals im Lagerbestand, Wertverlust durch Verderben, Altern und Schund von Ware, Versicherung)
- Kosten für Hilfsmittel
- Kosten der Lagerverwaltung (Softwarekosten)

Die Anhand von Praxisdaten bei Unternehmen des PA berechneten Lagerkosten sind mit einem Vielfachen der Gesamtenergiekosten verhältnismäßig hoch. Wobei die Betriebskosten des Lagers mit 97,8 % den Großteil der Lagerkosten ausmachen. Weil für die untersuchte Produktion für die strompreisabhängige Fertigung und Lagerhaltung auf ein bestehendes Lager zurückgegriffen wird und daher fixe Betriebskosten unabhängig von einer Implementierung einer strompreisabhängigen Verbrauchssteuerung und Lagerhaltung anfallen würden, wurden die Lagerbetriebskosten vernachlässigt.

Für die Lagerkosten ergeben sich einige betriebliche Restriktionen die bei der Entwicklung des Optimierungsmodells beachtet werden mussten. Die erste Restriktion ist die Beach-

tung von möglichen Anfangsbeständen einzelner Produkte, welche die weitere Planung beeinflussen. Zusätzlich wird je nach Lager aufgrund von räumlichen Begrenzungen die Lagerkapazität eingeschränkt. Auch wenn es zum Ausgleich von kurzfristigen Produktionsanpassungen Sicherheitsbestände für die jeweiligen Produkte vorliegen, können diese in der Produktionsprogrammplanung vernachlässigt werden. Einschränkungen durch eine zeitlich begrenzte Lagerbarkeit der Produkte konnten in Absprache mit Mitgliedern des PA als nicht signifikant identifiziert werden und konnten daher ebenfalls aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen werden.

Der durch die Produktionsprogrammplanung angeregte Auf- und Abbau von Produktionskapazitäten sorgt zusätzlich für Kosten und muss daher in das Optimierungsmodell integriert werden. Da KMU nicht ohne weiteres Anlagenkapazitäten durch die Akquise zusätzlicher oder den Abbau bestehender Maschinen vornehmen können belaufen sich die Kosten für Kapazitätsflexibilisierungen grundlegend auf Mitarbeiterkosten. Sowohl für tägliche Mehrarbeit als auch für Wochenendarbeiten müssen Unternehmen Überstundenzuschläge an ihre Mitarbeiter bezahlen. Diese Zuschläge sind in Arbeits- oder Tarifverträgen festgelegt und orientieren sich prozentual am Bruttostundenlohn. Da in der Produktionsprogrammplanung die grundlegend eingeplante Kapazität dem anliegenden Bedarf entspricht handelt es sich in den hier betrachteten Szenarien nicht um Mehrarbeit, da durch die konstanten Absatzmengen Überstunden an anderer Stelle automatisch eingespart werden.

Insbesondere in Hinblick auf die Kapazitätsflexibilität sind KMU betrieblich eingeschränkt. Arbeitszeiten der Mitarbeiter lassen sich wöchentlich nur bis zu einem bestimmten Maß flexibel verschieben. So lassen sich beispielsweise Zusatzschichten an Wochenenden fahren, jedoch ist dies in den meisten KMU nicht jedes Wochenende möglich. Diese Einschränkungen galt es ferner im Optimierungsmodell durch wöchentliche Mindestarbeitszeiten, maximal verschiebbare Stunden und Anzahl der verfügbaren Wochenenden eines Planungszeitraums abzubilden.

Als zusätzlichen Aspekt der Zielgrößen wurde untersucht, ob sich der Einfluss auf die Auftragswechselkosten (auch Rüstkosten) in der Produktionsprogrammplanung abbilden lässt. Nachdem in der Produktionsprogrammplanung ausschließlich prognostizierte Absatzmengen auf die einzelnen Planungseinheiten aufgeteilt werden, kann nicht mit ausreichender Sicherheit gesagt werden, ob die Umverteilung dieser Produktionsmengen die Summe der Auftragswechselkosten beeinflusst. Zudem werden in der entwickelten Methode entsprechend des Vorgehens zur Strukturierung der Arbeitspläne zusammengefasst

te Produktgruppen betrachtet. Wie sich die Rüstkosten innerhalb dieser Gruppen verhalten kann folglich nicht bestimmt werden. Schließlich können innerhalb der Produktionssteuerung auch kurzfristig noch Aufträge verschoben werden. Folglich wurden die Rüstkosten nicht als Bestandteil des Optimierungsmodells angenommen.

3.4 Formulierung des Optimierungsmodells

Die in diesem Forschungsprojekt angewandte Optimierungsmethode wird als lineare Optimierung oder im Englischen „linear programming“ bezeichnet. Grundlage dieses Verfahrens ist eine Zielfunktion, deren optimale Lösung gesucht wird. Die Zielfunktion kann dabei vom Typ „maximiere mit den gegebenen Randbedingungen die Zielgröße“ (z. B. den maximal erzielbaren Gewinn aus dem Verkauf begrenzter Ressourcen) oder „minimiere unter den gegebenen Rahmenbedingungen die Zielgröße“ (z. B. Kosten für die Produktion einer Menge an diversen Produkten). Der Ergebnisraum der Zielfunktion wird durch die Nebenbedingungen eingeschränkt. Diese Nebenbedingungen können als Gleichungen und Ungleichungen formuliert werden.

Die lineare Optimierung zeichnet sich dadurch aus, dass die Zielfunktion und alle Nebenbedingungen auf linearen Zusammenhängen basieren. Die lineare Optimierung kann auch um binäre Zielgrößen (Entscheidung 1 oder 0) erweitert werden. Von einer Sonderform der ganzzahlig-linearen oder ganzzahlig-gemischten Optimierung spricht man, wenn die Entscheidungsgrößen wie in der Zielfunktion dieses Forschungsprojekts nur durch ganzzahlige Werte erfüllt werden dürfen.

Im entwickelten Optimierungsmodell sind die Produktionsmengen verschiedener Produkte einer Verarbeitungsstufe über einen Zeitraum von mehreren Wochen geplant. Die Planung erfolgt wöchentlich für Tagesmengen, ohne einzelne Aufträge zu terminieren. Einzelne Produkte werden zu homogenen Gruppen zusammengefasst, die sich hauptsächlich in ihrer Produktionszeit und dem Energieverbrauch pro Stück unterscheiden. Jede Woche ist in Tage unterteilt, die je nach Strompreis exogen in Klassen unterteilt sind. Die einzelnen Klassen können sich in ihrer zeitlichen Länge und im Energiepreis unterscheiden, überschneiden sich jedoch nicht. Am Ende eines jeden Tages gibt es produktabhängige Anforderungen, für die keine Engpässe zulässig sind. Dieser Umstand ergibt sich aus der Verwendung des Modells in der Produktionsprogrammplanung, da die zu erwartenden Anforderungen in diesem Stadium der allgemeinen Produktionskapazität entsprechen.

Definitionen

Um optimale Lösungen für verschiedene Parametereinstellungen zu finden wurde das beschriebene Problem wie im Folgenden beschrieben mathematisch formalisiert und ein lineares Programm erstellt. Tabelle 1 zeigt die im Optimierungsmodell verwendeten Indizes.

Tabelle 1 Indizes im Optimierungsmodell

Indizes	
$p = 1, \dots, P$	Produkte
$t = 1, \dots, T$	Tage
$w = 1, \dots, W$	Wochen
$k = 1, \dots, K$	Klassen

Zusätzlich mussten die Klassen K in mehrere Größen unterteilt werden, um spezifische Bedingungen für die verschiedenen Mengen zu formulieren.

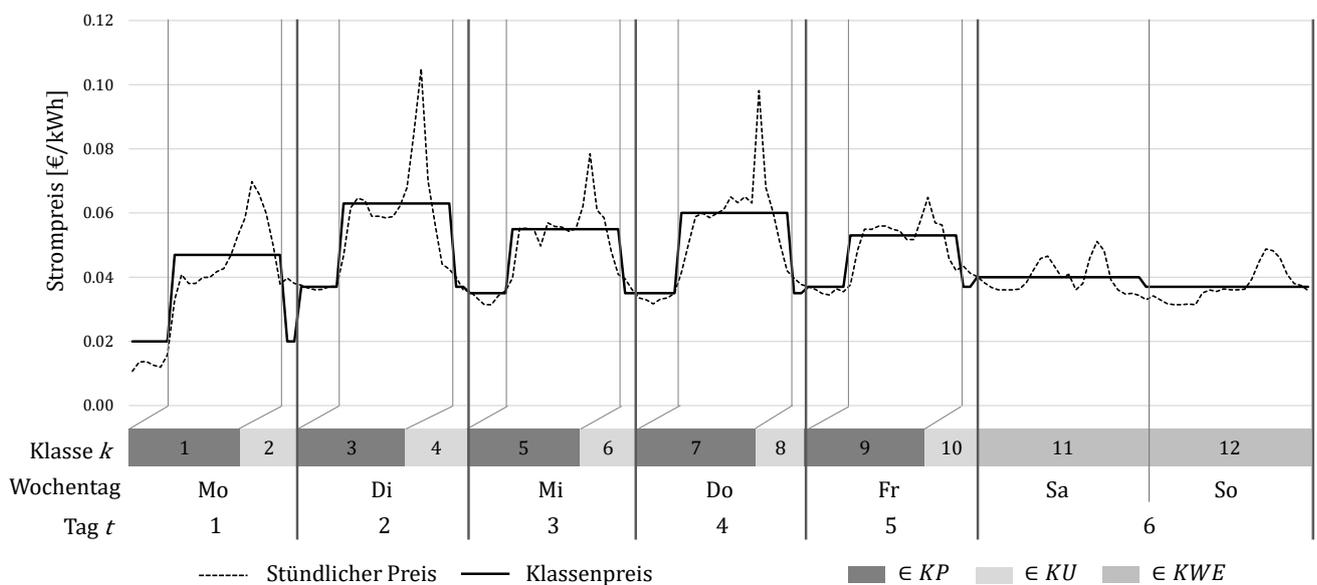


Bild 24 Verteilung der Klassen einer Woche ($k \in KW_w \cap K$)

Die in Bild 24 dargestellten Klassen stellen eine Woche KW_w als Teilmenge aller Klassen K dar. Dadurch kann das Modell wöchentliche maximale und minimale Produktionsmengen einstellen. Darüber hinaus sollte es möglich sein, zusätzliche Kapazitäten in Form von täglichen Überstunden und Wochenendarbeit zu nutzen. Ein Teil der täglichen Klassen enthält daher die geplante Kapazität, die die Teilmenge KP_t zusammenfasst. Mögliche zusätzliche Arbeitszeiten dieses Tages sind in KU_t zusammengefasst, mit denen auch Kosten für Überstunden berechnet werden. Für den Fall, dass es mehr als zwei Klassen pro Tag gibt, werden nur die geplanten Kapazitäten in weitere Untergruppen aufgeteilt, die

Überstundenklasse ist immer die letzte Klasse eines regulären Tages. Die Herstellungskapazitäten für ein Wochenende werden mit den Klassen KWE_w für die Wochenenden der einzelnen Wochen eingestellt und verrechnet. Es ist zu beachten, dass jeder sechste Tag ein Wochenende darstellt, für das die letzte Klasse nicht zusätzlich als Überstundenklasse erfasst werden muss.

Basierend auf diesen Größen wurden Entscheidungsvariablen definiert, die in Tabelle 2 aufgeführt sind.

Tabelle 2 Entscheidungsvariablen

Variablen		
$x_{p,k}$	Produktionsmenge von Produkt p in Klasse k	$\forall p \in P, k \in K$
$z_{p,t}$	Lagermenge von Produkt p an Tag t	$\forall p \in P, t \in T$
y_w	= 1, wenn Produkte am Wochenende von Woche w gefertigt werden = 0, sonst	$\forall w \in W$

Zusätzlich sind die notwendigen Parameter, die Informationen von außen in das Modell einbeziehen, in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3 Modellparameter

Parameter		
u_p	Stromverbrauch von Produkt p [kWh/Mengeneinheit]	$\forall p \in P$
d_p	Durchsatz von Produkt p [Mengeneinheit/h]	$\forall p \in P$
e_k	Strompreis in Klasse k [€/kWh]	$\forall k \in K$
PW_p	Bruttoproduktionswert von Produkt p [€/quantity unit]	$\forall p \in P$
L	Lagerhaltungskostensatz	
$minW$	Wöchentliche Mindestkapazität [h]	
cWE	Maximale Anzahl an Wochenenden im Planungszeitraum	
$maxC_k$	Maximale Kapazität der Klasse k [h]	$\forall k \in K$
$s_{p,t}$	Bedarf von Produkt p an Tag t [Mengeneinheit]	$\forall p \in P, t \in T$
$zInit_p$	Anfangsbestand von Produkt p [Mengeneinheit]	$\forall p \in P$
ZW_k	Wochenendzuschläge in Klasse k [€/h]	$\forall k \in KWE$
ZU_k	Überstundenzuschläge in Klasse k [€/h]	$\forall k \in KU$

Optimierungsmodell

In der Zielfunktion (1) wird die Produktionsmenge eines Produkts in einer Klasse mit der Durchsatzrate und dem Stromverbrauch des Produkts sowie dem Elektrizitätspreis der Klasse multipliziert, um die gesamten Energiekosten zu erhalten. Die Lagerkosten ergeben sich aus der Lagermenge an jedem Ende eines Tages multipliziert mit dem Lagerhaltungskostensatz. Um Überstundenprämien einzubeziehen, werden die Produktionsvariablen der jeweiligen Klassen mit der Produktdurchsatzrate und den entsprechenden Zuschlägen multipliziert. Die Addition dieser Kostenfaktoren führt zu einer Minimierung der Gesamtkosten.

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \sum_{p \in P} \left(\sum_{k \in K} (x_{p,k} \cdot d_p \cdot u_p \cdot e_k) + \sum_{t \in T} (z_{p,t} \cdot PW_p \cdot L) + \sum_{k \in KWE} (x_{p,k} \cdot d_p \cdot ZW_k) \right. \\ & \left. + \sum_{k \in KU} (x_{p,k} \cdot d_p \cdot ZU_k) \right) \end{aligned} \quad (1)$$

Darüber hinaus definieren eine Reihe von Nebenbedingungen die zugrundeliegenden Einschränkungen für die Erstellung eines realisierbaren Produktionsprogramms.

$$\sum_{p \in P} \sum_{k \in KW_w} x_{p,k} \cdot d_p \geq \text{min}W \quad \forall w \in W \quad (2)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{k \in KWE_w} x_{p,k} \cdot d_p \leq \sum_{k \in KWE_w} (\text{max}C_k) \cdot y_w \quad \forall w \in W \quad (3)$$

$$\sum_{w \in W} y_w \leq cWE \quad (4)$$

$$\sum_{p \in P} x_{p,k} \cdot d_p \leq \text{max}C_k \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$z_{p,t-1} + \sum_{k \in K} (x_{p,k}) - s_{p,t} = z_{p,t} \quad \forall p \in P, t = \{2, \dots, T\} \quad (6)$$

$$z_{\text{Init}_p} + \sum_{k \in K} (x_{p,k}) - s_{p,t} = z_{p,t} \quad \forall p \in P, t = \{1\} \quad (7)$$

$$z_{p,t}, x_{p,k} \in \mathbb{N} \quad (8)$$

$$y_w \in \{0,1\} \quad (9)$$

Die Nebenbedingung (2) stellt sicher, dass eine Mindestarbeitszeit innerhalb einer Woche geplant ist. Nebenbedingungen (3) und (4) regeln die Planung zusätzlicher Wochenenden. Nebenbedingung (3) stellt die Einhaltung zulässiger Produktionszeiten sicher. Diese wird an nicht eingeplanten Produktionswochenenden auf null gesetzt. Entsprechend gibt

Nebenbedingung (4) die maximale Anzahl von Wochenenden an, die eingeplant werden können. Nebenbedingung (5) schränkt die geplanten Produktionsmengen innerhalb einer Klasse auf die maximal mögliche Produktionszeit dieser Klasse ein.

Die Nebenbedingungen (6) und (7) regulieren die Lagerung. Daher berechnet die Nebenbedingung (6) den Lagerbestand am Ende des Tages aus dem Inventar des vorherigen Tages, der täglichen Produktion und der täglichen Bedarfe. In Kombination mit Nebenbedingung (8), welche nur positive ganzzahlige Zuordnungen für Produktions- und Lagermengen zulässt, verhindert diese Bedingung auch, dass Verkaufsmengen nicht bedient werden. Nebenbedingung (7) zeigt für jedes Produkt ein Anfangsbestand an. Die maximale Speicherkapazität wird automatisch durch die maximal verfügbare Kapazität begrenzt und muss daher nicht individuell definiert werden.

3.5 Anwendung des Optimierungsmodells zur Produktionsprogrammplanung

Lösung des Optimierungsmodells

Nach der Formulierung des Modells zur energiekostenorientierten Produktionsprogrammplanung galt es zu prüfen, ob die formulierten Nebenbedingungen vollständig sind und eingehalten werden. Darüber hinaus musste untersucht werden, ob das Optimierungsmodell mit der entwickelten Zielfunktion die optimale Lösung einer Testinstanz finden kann. Dazu wurde das Modell mit der Programmiersprache Python implementiert und in iterativen Schritten angepasst, bis das Optimierungsproblem für eine einfache Testinstanz zu einer ersten Lösung führte. Zur Errechnung einer solchen Lösung wurde ein exaktes Verfahren verwendet, welches die Berechnung von optimalen Lösungen ermöglicht. Dies wurde in dem Solver Gurobi umgesetzt. Danach wurden weitere Testinstanzen generiert, die sich in der Komplexität hinsichtlich des Planungshorizonts und der Anzahl an Produkten unterschieden. Anhand der errechneten Lösungen der Testinstanzen, wurden logische Fehler in der Modellformulierung identifiziert und beseitigt, sodass alle geforderten Restriktionen eingehalten werden.

Genaue Lösungsmethoden wie lineare Programmierungen haben oft nur begrenzten Erfolg, da eine Zunahme der Anzahl der Variablen (bspw. durch die Anzahl der betrachteten Produkte) einen exponentiellen Anstieg der Lösungszeit verursacht. Daher werden für Probleminstanzen mit komplexem Lösungsraum heuristische Suchtechniken bevorzugt. So wurde auch in diesem Forschungsprojekt auf Basis des mathematischen Optimierungsmodells eine Heuristik definiert. Heuristiken sind Algorithmen, die in einem begrenzten Zeitrahmen eine Lösung für ein gegebenes Problem finden können. Einige Heuristiken erreichen schnell eine suboptimale Lösung (z. B. myopische oder naive Strategie), während andere zu einer optimalen Lösung (z. B. Simulated Annealing, genetische Algorithmen und Tabu-Suche) auf Kosten längerer Laufzeiten führen können.

Der Greedy- (oder myopische) Algorithmus beginnt mit einer realisierbaren Lösung. Die aktuelle Lösung wird daraufhin nur gegen eine andere ausgetauscht, wenn sich die Zielfunktion verbessert. Der Prozess wird fortgesetzt, bis keine weiteren Verbesserungen mehr möglich sind. Der Algorithmus ist einfach zu implementieren und gibt eine gute Lösung zurück, aber die Lösung kann suboptimal sein. Der Algorithmus kann wirksam sein, wenn er wiederholt angewendet wird, solange sich die anfänglich zulässige Lösung än-

dert. Wobei der Greedy-Algorithmus und andere naive Strategien häufig in einem lokalen Optimum stecken bleiben.

Die Tabusuche verwendet dynamisch erzeugte Tabus, um die Lösungssuche zur optimalen Lösungen zu führen. Mögliche Lösungen für ein Problem und unmittelbare lokale Nachbarn werden untersucht, um eine verbesserte Lösung zu finden. Die Suche erstellt dynamisch eine Reihe von Regeln und verhindert, dass das System redundant im gleichen Bereich sucht, indem regelwidrige Lösungen als "tabu" oder verboten markiert werden. Diese Methode löst das Problem lokaler Suchmethoden, wenn die Suche in suboptimalen Regionen oder in Bereichen blockiert ist, in denen mehrere gleichwertige Lösungen vorhanden sind.

Genetische Algorithmen sind eine Teilmenge einer größeren Klasse von evolutionären Algorithmen, die eine Reihe von Techniken beschreiben, die von natürlicher Selektion wie Vererbung, Mutation und Crossover inspiriert sind. Genetische Algorithmen erfordern sowohl eine genetische Repräsentation der Lösungsdomäne als auch eine Fitnessfunktion, um die Lösungsdomäne zu bewerten. Die Technik erzeugt eine Population von Kandidatenlösungen und verwendet die Fitnessfunktion, um die optimale Lösung durch Iterieren mit jeder Generation auszuwählen. Der Algorithmus wird beendet, wenn das befriedigende Fitnessniveau für die Population erreicht wurde oder die maximalen Generationen erreicht wurden.

Der Hauptvorteil des Simulated Annealing ist seine Fähigkeit, zu verhindern, dass es bei einem lokalen Maximum gefangen wird. Bei jeder Iteration wird nach Wahrscheinlichkeiten entschieden zwischen dem aktuellen Zustand oder dem Wechsel zu einem anderen Zustand, während er das System letztlich in den Zustand der niedrigsten Energie führt. Der Algorithmus akzeptiert dabei nicht nur die Änderungen, welche die Zielfunktion verbessern, sondern auch nicht-verbessernde Bewegungen, die bei einer bestimmten Wahrscheinlichkeit akzeptiert werden. Die Akzeptanzwahrscheinlichkeit nimmt ab, wenn die Temperatur (oder das System) abkühlt. Vorteil des Simulated Annealing ist, dass die Ergebnisqualität nicht abhängig von der ausgewählten Startlösung ist. Darüber hinaus kann die Methode eingesetzt werden um gemischt-ganzzahlige, diskrete oder kontinuierliche Probleme zu lösen. Für die vorliegende Problemstellung der Nutzung von Lagerbestand als Energiespeicher wurde entschieden einen Simulated Annealing Algorithmus zu implementieren um auch für komplexere Problemstellungen anwendungsorientierte Lösungen zu finden.

Die Heuristik besteht dabei aus einem Eröffnungsverfahren, in dem eine zulässige Lösung konstruiert wird und einem Verbesserungsverfahren, in welchem bessere Lösungen durch das Durchsuchen der Nachbarschaft der aktuellen Lösung gefunden werden sollen. Für den Fall, dass sich die Produktionsdauern unterscheiden und sich nicht zu Mengen gleicher Länge zusammenfügen lassen, kann eine Heuristik dabei nicht garantieren, eine zulässige Lösung in polynomialer Zeit zu finden. Daher wird im Weiteren davon ausgegangen, dass die Produktionszeiten aller Produkte gleich sind. Außerdem werden die Klassengrößen als Vielfaches dieser Produktionszeit gewählt.

Eröffnungsverfahren

Um eine zulässige Anfangslösung zu erstellen werden im Eröffnungsverfahren die Bedarfsmengen sukzessive verteilt. Nachdem die Ergebnisqualität unabhängig von der Anfangslösung ist wird darauf verzichtet eine zufällige Lösung zu generieren, da diese zudem entsprechend der Nebenbedingungen zulässig sein muss. Somit wird im Eröffnungsverfahren für jede Einheit eines täglichen Bedarfs eines Produktes die am nächsten gelegene Klasse bestimmt, in der sie produziert werden kann. Von dieser Regel wird abgewichen, wenn die nächstgelegene Klasse bereits vollständig von anderen Bedarfen belegt ist. In diesem Fall wird die nächste noch verfügbare Klasse identifiziert und der Bedarf entsprechend zugewiesen. Bei dieser Verteilung werden jegliche Kostenarten (bspw. für Strom, Lager und Kapazitätsflexibilität) außer Acht gelassen.

Verbesserungsverfahren

In dem Verbesserungsverfahren wird die Nachbarschaft der konstruierten Lösung durchsucht, um so bessere Lösungen finden zu können. Dazu wird in diesem Fall der Ansatz des Simulated Annealing genutzt. Die Methode wurde in Anlehnung an Abkühlungsprozesse von Metallen konzipiert. Beim Tempern wird ein Feststoff auf eine hohe Temperatur erhitzt und allmählich abgekühlt, um zu kristallisieren. Ein zu schnelles Abkühlen verhindert, dass die Atome das thermische Gleichgewicht erreichen. Wenn der Feststoff hingegen langsam abgekühlt wird, gibt es den Atomen genügend Zeit, sich auszurichten, um einen minimalen Energiezustand zu erreichen. Diese Analogie kann in Optimierungen mit den Zuständen des Festkörpers entsprechend der realisierbaren Lösung verwendet werden, wobei die jeweilige Energie der Zielfunktion entspricht und die minimale Energie die optimale Lösung ist.

Simulated Annealing besteht aus zwei ineinander geschachtelten Schleifen, deren Ablauf maßgeblich durch den Verlauf einer eingestellten Temperatur T kontrolliert wird. Dabei wird zunächst in der inneren Schleife eine Nachbarlösung der aktuell betrachteten Lösung erzeugt und temperaturabhängig akzeptiert. Es gilt je höher die Temperatur ist desto größere Verschlechterungen werden akzeptiert. Nach einer festgelegten Anzahl an Iterationen wird in der äußeren Schleife die Temperatur abgesenkt. Für die Heuristik wird entsprechend ein dem Problem angepasstes Abkühlungsschedule durchlaufen um zu gewährleisten, dass die Temperatur nicht zu schnell abkühlt. Beginnend von einer Starttemperatur T_{e0} werden in $a \in \mathbb{N}$ Abkühlungsschritten jeweils b Nachbarn untersucht.

Um einen Nachbarn der aktuellen Lösung x zu konstruieren, wird nun ein Nachbarschaftsoperator definiert. Dabei werden zufällige Einheiten ausgeplant und in der Folge vollkommen zufällig wieder eingeplant. Die Anzahl der umzuplanenden Einheiten ergibt sich dabei aus der Produktionskapazität der vorhandenen Wochenenden. Dies garantiert die Möglichkeit einer Erreichbarkeit des globalen Optimums, da somit Wochenenden komplett ausgeplant werden können. Für die Starttemperatur gilt, dass jeder Nachbar mit einer relativ hohen Wahrscheinlichkeit noch angenommen werden soll. In diesem Fall beträgt die maximale mögliche Verschlechterung einer Einplanung der Einheiten mit den höchsten Differenzen von ihrer billigsten auf ihre teuerste Klasse. Als Abbruchtemperatur wird die geringste mögliche Verschlechterung einer Einheit gewählt. Die Abkühlung in jedem Schritt erfolgt entsprechend einer Güte von 0,95, woraus sich ebenso die Anzahl der Abkühlungsschritte ergibt.

Implementierung in Softwaredemonstrator

Sowohl die hier vorgestellte Modellierung, als auch die Heuristik wurden in Python umgesetzt. Darüber hinaus wurde ein Excel-Tool entwickelt, welches das Erzeugen beliebiger Instanzen möglich macht. Für diese Instanzen kann dann aus der Excel-Datei heraus der Aufruf der Python-Skripte zur Lösung dieser Instanzen erfolgen. Dabei besteht die Möglichkeit zwischen der Heuristik und dem Linearen Problem zu wählen. Die Lösungen werden ebenfalls in einer Excel-Datei ausgegeben und in einem Unterordner gespeichert.

3.6 Untersuchung der Potenziale und Grenzen der Methode

Nachdem das vorliegende Problem nun hinreichend untersucht wurde, soll im Weiteren der Nutzen einer Produktionsplanung unter Einbeziehung der Energiekosten bewertet werden. Dazu wird ein Datengerüst von Testinstanzen definiert. Diese Testinstanzen werden als Simulationen der Produktionsprogrammplanung eines KMU durchgeführt. Dazu wird ein Standard definiert, von dem parametrische Änderungen in der Kostenstruktur vorgenommen werden, um differenzierte Aussagen treffen zu können. Die Parameter eines durchschnittlichen Produktionsunternehmens, die in Tabelle 4 angegeben sind, wurden aus den aufgenommenen Praxisdaten und mit Hilfe einer definierten Produktionsstruktur gewonnen.

Tabelle 4 Standardparameter eines produzierenden KMU

P	Anzahl Produkte	2
W	Planungshorizont	4 Wochen
	Anzahl Klassen pro Tag	2
e_k	Strompreisschwankungen	hoch (Daten KW 45-48 aus 2016)
	Genauigkeit der Strompreisprognose	optimal
u_1	Stromverbrauch von Produkt 1	100 kW
u_2	Stromverbrauch von Produkt 2	300 kW
$maxC_k$	Geplante Kapazität pro Tag	16 h/Tag $\forall k \in KP$
$minW$	Wöchentliche Mindestkapazität	40 h/Woche
cWE	Maximal Anzahl genutzter Wochenenden im Planungszeitraum	4
$maxC_k$	Maximale Zusatzkapazität	100 % der $k \in KU, KWE$
ZW_k, ZU_k	Zusatzkosten für Wochenenden und Überstunden	5 €/h $\forall k \in KU, KWE$
PW_p	Bruttoproduktionswert	50 €/h $\forall p \in P$
L	Lagerhaltungskostensatz	1 %
$s_{p,t}$	Bedarf	Äquivalent von 8 h Kapazität während der Woche und 0 h am Wochenende $\forall p \in P, t \in T$
$zInit_p$	Anfangsbestand	0 $\forall p \in P$

Basierend auf diesen Werten wurde das Optimierungsmodell angewendet um exakte Werte zur Bestimmung des Potenzials zu nutzen. Die Ergebnisse des Standardfalls werden nachfolgend beschrieben.

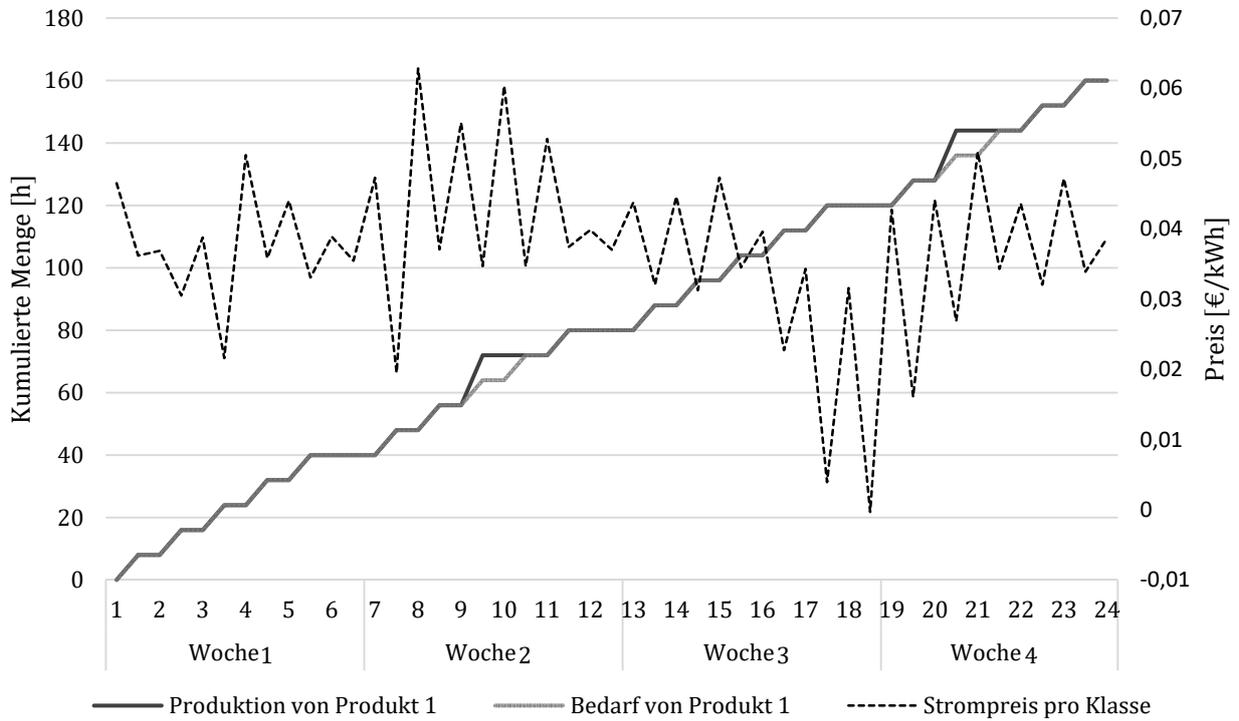


Bild 25 Produktionsprogrammplanung für Produkt 1 mit geringem relativem Stromverbrauch

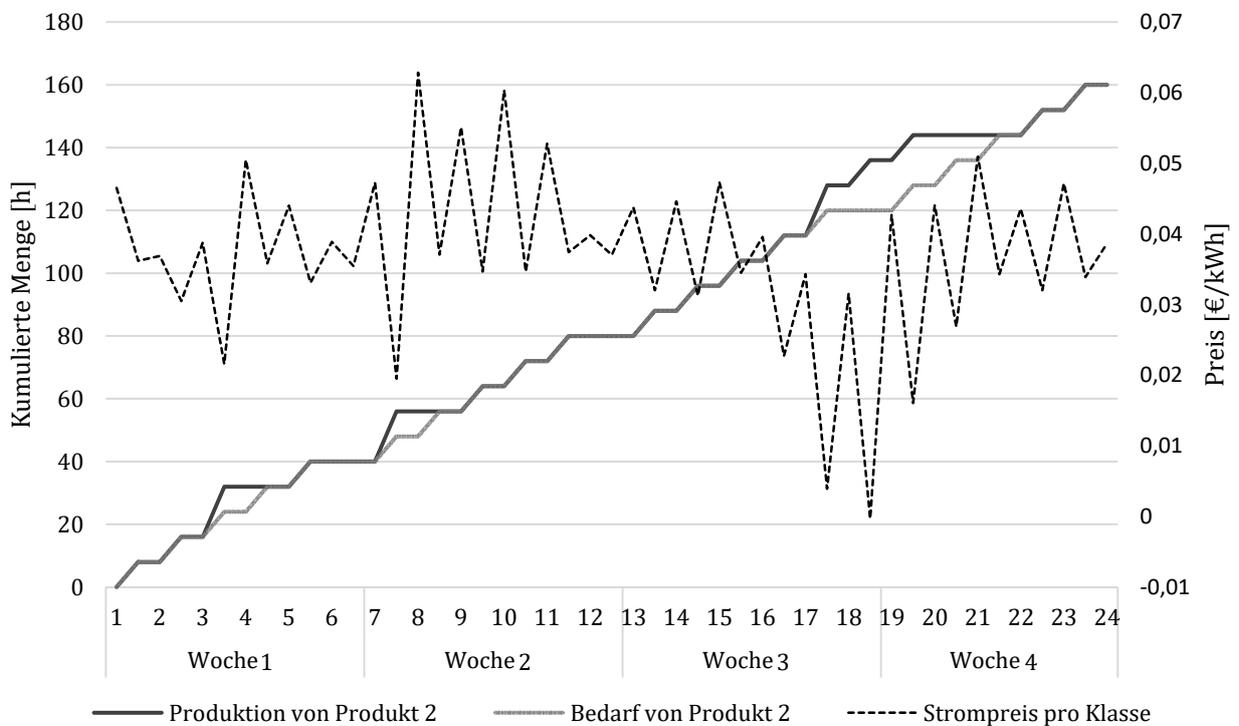


Bild 26 Produktionsprogrammplanung für Produkt 2 mit hohem relativem Stromverbrauch

Bild 25 und Bild 26 zeigen die Produktionsprogrammplanungen auf Basis des Optimierungsmodells. Die erste Grafik zeigt die Planung von Produkt 1 mit einem geringen relativen Stromverbrauch. Die zweite Grafik zeigt die Planung von Produkt 2 mit einem hohen relativen Stromverbrauch. In beiden Diagrammen zeigt das Produktions- und Nachfrage-diagramm die jeweilige kumulierte Menge. Durch die Erhöhung des Produktionsvolumens eines Produkts kann der Graph der Produktionsmenge den des Bedarfs überschreiten, wodurch Bestand generiert wird (angezeigt durch den Bereich zwischen dem Produktions- und dem Bedarfsgraphen). Dies kann entweder dadurch erreicht werden, dass die geplante Kapazität nur einem Produkt zugewiesen wird oder zusätzliche Kapazitäten genutzt werden.

Der auffälligste Effekt dieses beispielhaften Produktionsplans ist, dass die Produktion von Produkt 2 am Ende der dritten Woche aufgrund der niedrigen Strompreise steigt (siehe Bild 26). An dieser Stelle fungiert das Inventar als Energiespeicherlösung. Die Gesamtkosten für den betrachteten Zeitraum betragen 2.707,80 €. Im Vergleich dazu würde ein konventioneller Produktionsplan (ohne Berücksichtigung der Energiekosten in der Zielfunktion), bei dem die Produktion der Nachfrage ohne Erzeugung von Lagerbestand folgen würde, zusammen 2.984,95 € ergeben. Dies ergibt erhebliche Einsparungen von 8,6 Prozent durch das Optimierungsmodell.

Parameterstudie

Zur besseren Abschätzung des Gesamtpotenzials der Methode wurden einzelne Parameter des Standardfalls variiert. Dazu wurde in jedem Lauf nur einer der Parameter geändert, sodass der Effekt dessen isoliert betrachtet werden konnte. Zuerst sollen die vorgenommenen Veränderungen beschrieben und dann im Vergleich miteinander die Ergebnisse diskutiert werden.

Szenario 1: Anzahl der Produkte

Die Anzahl der Produkte P wurde auf vier erweitert. In Zuge dessen musste der Bedarf der einzelnen Produkte $s_{p,t}$ auf das Äquivalent von vier Stunden pro Tag außer an Wochenenden reduziert werden. Die Produkte unterscheiden sich nur in ihren Stromverbräuchen. Somit mussten auch diese angepasst werden. Um in Summe den gleichen Stromverbrauch wie im Standard zu erhalten, wurden die Stromverbräuche wie in **Tabelle 1** dargestellt festgesetzt.

Tabelle 5 Festgelegte Stromverbräuche der einzelnen Produkte

p	1	2	3	4
u_p	50 kW	150 kW	250 kW	350 kW

Szenario 2: Planungshorizont

Der Planungshorizont ist ein wichtiger Aspekt der Produktionsprogrammplanung, der momentan jedoch noch enorm durch die Möglichkeit der Strompreisprognose eingegrenzt wird. In dem zweiten Szenario wird der Planungshorizont W auf acht Wochen festgelegt. Um keine Effekte einer veränderten Strompreisschwankung zu unterliegen, wurden die angenommenen Strompreise der Standardplanung für die zusätzlichen vier Wochen wiederholt.

Szenario 3: Anzahl Klassen pro Tag

Mit der Anzahl der Klassen pro Tag kann die Volatilität des Strompreises innerhalb eines Tages dargestellt werden. Bei einem gleichen Mittelwert an zwei verschiedenen Tagen mit jedoch unterschiedlich hoher Schwankung wäre unter Umständen auch eine unterschiedliche Mengenverteilung der Produkte sinnvoll. Für das Szenario 3 wurden fünf Klassen pro Tag angenommen, wobei nur die Klasse $k \in KP_t$ in vier Klassen aufgeteilt wurde. Dabei gilt zu beachten, dass die Aufteilung nicht chronologisch, sondern preislich erfolgt ist (vgl. Bild 27).

Uhrzeit	Preis		
0:00	10,32	12,65	
1:00	8,73	14,57	Klasse 1
2:00	7,00	14,76	14,19
3:00	8,04	14,78	
4:00	8,96	15,78	
5:00	11,89	16,1	Klasse 2
6:00	12,65	16,59	16,27
7:00	16,59	16,61	
8:00	17,19	17,19	
9:00	18,75	18,75	Klasse 3
10:00	16,10	19,52	18,97
11:00	15,78	20,41	
12:00	14,76	23,16	
13:00	14,57	26,37	Klasse 4
14:00	14,84	28,57	26,99
15:00	16,61	29,85	
16:00	19,52	10,32	
17:00	26,37	8,73	
18:00	29,85	7,00	
19:00	28,57	8,04	Klasse 5
20:00	23,16	8,96	11,43
21:00	20,41	11,89	
22:00	19,85	19,85	
23:00	16,68	16,68	

Bild 27 Aufteilung der Klassen $k \in KP_t$ nach Preisstufen

Dazu wurden die zur Verfügung stehenden Stunden nach dem Preis sortiert und dann in vier gleich lange Klassen eingeteilt. Dies ist möglich, da die Produktionsprogrammplanung keine exakte zeitliche Einplanung der Mengen vornimmt. So können die täglichen Strompreisschwankungen bestmöglich beschrieben werden.

Szenario 4: Strompreisschwankungen

Im Standard wurden Wochen mit einer hohen Strompreisschwankung ausgesucht. Zum Vergleich wurden in Szenario 4 die Strompreise e_k des Spotmarkts der KW 10-13 aus 2016 angenommen, welche geringere Strompreisschwankungen aufweisen.

Szenario 5: Genauigkeit der Strompreisprognose

In allen anderen Szenarien wird davon ausgegangen, dass die Strompreisprognose den optimalen Wert, folglich den endgültigen Strompreis bestimmen kann. In dem fünften Szenario werden die durch die Strompreisprognose errechneten Werte als Grundlage der Planung angenommen.

Szenario 6.1: Höhe des Stromverbrauchs

In Szenario 6.1 wurde die Auswirkung der Höhe des Stromverbrauchs u_p der einzelnen Produkte untersucht. Alternativ wurden dazu folgende Werte angenommen:

u_1	Stromverbrauch von Produkt 1	300 kW
u_2	Stromverbrauch von Produkt 2	500 kW

Szenario 6.2: Differenz der Stromverbräuche

Neben der relativen Höhe des Stromverbrauchs galt es ebenso zu überprüfen wie sich die Kosteneinsparungen verhalten, wenn die Produkte gleich viel Strom verbrauchen. Dafür wurde $u_p = 400 \text{ kW} \forall p \in P$ gesetzt. Der Vergleich der Verbesserungen zwischen Szenario 6.1 und 6.2 beschreibt den Anteil der Verbesserung der durch die Differenz der Stromverbräuche auftritt.

Szenario 7: Geplante Kapazität pro Tag

In dem Standardszenario wurde von einem zwei-Schicht-Modell ohne geplante Wochenendarbeit ausgegangen, welches in Folge ohne eine kapazitative Erweiterung der Anlagen Zusatzkapazitäten zulässt. In diesem Szenario wird von einem drei-Schicht-Modell also durchgehender Produktion ohne geplante Wochenendarbeit ausgegangen. Dadurch erhöht sich $\max C_k$ auf 24 h/Tag $\forall k \in KP$, entsprechend stehen nur zusätzliche Stunden an Wochenende zur Kapazitätsflexibilität zur Verfügung. Diese wurden zusätzlich von 8 h/Tag zusätzlicher Kapazität auch 24h/Tag erhöht. Da die Produktionsprogrammplanung von einer grundlegenden Abstimmung der Kapazität auf den Bedarf ausgeht wurden entsprechend auch die Bedarfe der Produkte $s_{p,t}$ auf ein Äquivalent der geplanten Kapazität gebracht.

Szenario 8: Maximale Anzahl genutzter Wochenenden

Da KMU ungern ihre Mitarbeiter jedes Wochenende einplanen wollen, auch wenn dort typischerweise günstigere Strompreise zu beobachten sind, wurde in Szenario 8 die maximale Anzahl der genutzten Wochenenden im Planungszeitraum cWE auf ein Wochenende reduziert.

Szenario 9.1 & 9.2: Lagerhaltungskostensatz

Zur Analyse der Auswirkungen der Lagerkosten wurde der Lagerhaltungskostensatz L in Szenario 9.1 auf 0,25 % gesenkt und in Szenario 9.2 auf 4 % erhöht.

Szenario 10: Bedarfsverteilung

Aufgrund der täglichen Bedarfe der Produkte hat das Modell nur eine geringe Belastungsflexibilität. In dem letzten Szenario wurden die Bedarfsmengen der Produkte $s_{p,t}$ insgesamt gleich gelassen, diese jedoch summiert ans Ende der jeweiligen Woche gelegt. Bei diesem Szenario gilt es darauf zu achten, dass auch in einer Planung ohne Energiekostenoptimierung Lagerbestände durch die planmäßige wöchentliche Produktion entstehen.

In Tabelle 6 sind die Ergebnisse der geplanten Szenarien dargestellt.

Tabelle 6 Ergebnisse der Parameterstudie

Szenario		1	2	3	4	5	6.1
	Standard	4 Produkte	8 Wochen	5 Klassen/T	KW 10-13 (2016)	Prognose	300kW 500kW
Gesamtkosten ohne EKO [€]	2984,95	2984,95	5969,90	2984,95	1794,57	2984,95	5969,90
Gesamtkosten mit EKO [€]	2727,80	2662,84	5455,59	2589,96	1794,57	2985,02	5126,74
Absolute Veränderung [€]	-257,16	-322,11	-514,31	-395,00	0,00	0,07	-843,16
Prozentuale Veränderung	-8,6%	-10,8%	-8,6%	-13,2%	0,0%	0,0%	-14,1%
Delta zu Standard	↖	-2,2%	0,0%	-4,6%	8,6%	8,6%	-5,5%
Szenario		6,2	7	8	9,1	9,2	10
	Standard	400kW	3 Schicht	1 WE	L 0,25%	L 4%	B EdW
Gesamtkosten ohne EKO [€]	2984,95	5969,90	3926,19	2984,95	2984,95	2984,95	3464,95
Gesamtkosten mit EKO [€]	2727,80	5358,14	3470,95	2727,79	2657,91	2799,24	3045,92
Absolute Veränderung [€]	-257,16	-611,76	-455,23	-257,16	-327,04	-185,71	-419,03
Prozentuale Veränderung	-8,6%	-10,2%	-11,6%	-8,6%	-11,0%	-6,2%	-12,1%
Delta zu Standard	↖	-1,6%	-3,0%	0,0%	-2,3%	2,4%	-3,5%

Für jedes Szenario wurden die Gesamtkosten ohne Energiekostenoptimierung (EKO), die Gesamtkosten mit Energiekostenoptimierung, die absolute und prozentuale Veränderung sowie das Delta zum Standard ermittelt. In Szenario 4 und 5 hat das Modell keine Kostenersparnisse erzielen können, so zeigt sich, dass ausreichende Strompreisschwankungen und eine möglichst exakte Prognose dieser essenziell für die erfolgreiche Nutzung von Lagerbestand als Energiespeicher sind. Die Erweiterung des Planungshorizonts in Szenario 2 sowie die Begrenzung der Anzahl der Wochenenden in Szenario 8 hatten auf die betrachteten Parameter keine Auswirkung. Von den verbleibenden Szenarien verschlechterte sich das Ergebnis nur für Szenario 9.2 da durch die erhöhten Lagerkosten die Gesamteinsparungen des Optimierungsmodells geringer ausfielen. Den größten Effekt auf die Optimierung hatte die Steigerung des Stromverbrauchs in Szenario 6.1. Wobei auch die Steigerung der Klassen pro Tag, sowie die Verschiebung der Bedarfsverteilung auf das Ende der Woche zu signifikanten Verbesserungen der Optimierung geführt haben. In Summe zeigt die Parameterstudie, dass mit dem Optimierungsmodell Gesamtkosteneinsparungen zwischen 6 und 14 % möglich sind. Für das gesamte verarbeitende Gewerbe belaufen sich die produktionsverbundenen Stromkosten auf ca. 20 Mrd. €. Von diesen Kosten sind rund 20 % Anteil der durch den Arbeitspreis beschriebenen Beschaffungskosten. Im Falle einer Optimierung im Standardfall (8,6 % Einsparungen) ließen sich so gesamtwirtschaftlich 344 Mio. € einsparen. Dieses erhebliche Einsparpotenzial lässt sich jedoch nur dann heben, wenn Unternehmen ihren Strom zu dynamischen Strompreisen beziehen, die Strompreisprognose optimal läuft und die Strompreise eine hohe Volatilität aufweisen.

4 Verwendung der Zuwendung

4.1 Verwendung der Zuwendung in den Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung 1

- Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)
2 wissenschaftliche Mitarbeiter mit besonderen Kenntnissen im Bereich Logistik/Produktionsmanagement für 28 Monate
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)
Lizenz für Modellierungssoftware in Höhe von 2.900 €

Forschungseinrichtung 2

- Wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)
2 wissenschaftliche Mitarbeiter mit besonderen Kenntnissen im Bereich Energie- und Umwelttechnik für 13,5 Monate
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)
1 Nutzung von Strompreisprognose tool in Höhe von 10.000 €

4.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Für das Projekt wurde eine ausgabenneutrale Verlängerung um einen Monat beantragt. Das Projektende hat sich damit vom 28.02.2018 auf den 31.03.2018 verschoben.

Die durchgeführten Arbeiten und der Personaleinsatz waren zur Erreichung des Projektzieles notwendig. Der Einsatz des Personals war bei der inhaltlichen Komplexität und dem zeitlichen Aufwand notwendig und angemessen.

4.3 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse

In dem Projekt sollte überprüft werden, ob die energiekostenoptimierte Produktionsprogrammplanung wirtschaftlich ist. Im idealen Fall könnte dann das gefüllte Lager als eine Form der verlustfreien Energiespeicherung gesehen werden. Die derart „gespeicherte“ Energie soll in Zeiten geringerer Verfügbarkeit (und höherer Strompreise) abgerufen werden, indem diese Güter aus dem Lager entnommen werden. Die Produktion wird wäh-

renddessen entweder mit geringerer Intensität bzw. Auslastung betrieben oder beschränkt sich auf solche Herstellungsprozesse mit einem geringeren Strombedarf.

Zur Überprüfung dieses Ansatzes wurde ein Optimierungsmodell erstellt, das bei variablen Strompreisen als Grundlage zur Ermittlung des konkreten Einsparpotenzials aus Parameterstudien dient.

Den potenziellen Nutzerkreis der zu entwickelnden Methode stellen in erster Linie produzierende Unternehmen dar, welche über ein Produktportfolio mit signifikant variierendem Bedarf an elektrischer Energie in den Herstellungsprozessen verfügen. Darüber hinaus sollten die Material- und damit die Produktwerte sowie die Kosten einer Lagerung gering sein, um den positiven Effekt der Energiekosteneinsparung nicht durch hohe Kapitalbindungs- und Lagerhaltungskosten aufgrund gesteigerter Lagerbestände zu verlieren. Eine gute Planbarkeit von Kundenbedarfen ist weiterhin vorteilhaft, da der Aufbau größerer Lagerbestände die Wirtschaftlichkeit potenziell beeinträchtigen kann. Mögliche Anwender könnten demzufolge z. B. metallverarbeitende Unternehmen mit heterogenen Arbeitsplänen oder Hersteller von Kunststoffteilen unterschiedlicher Größe und Materialien sein.

Mit der Methode zur energiekostenorientierten Produktionsprogrammplanung lassen sich unter bestimmten Voraussetzungen die Gesamtkosten senken, sodass Lagerbestand als Energiespeicher genutzt werden kann. Die Methode kann branchenübergreifend in der Produktionsplanung produzierender Unternehmen eingesetzt werden. Durch die Implementierung in einem Excel-basierten Softwaredemonstrator ist eine Nutzung ohne das Beschaffen von Spezialsoftware möglich. Benötigt wird nur eine Python-Umgebung. Diese macht den Einsatz der Methode auch für KMU interessant. Allerdings werden für die Methode die Energieverbräuche der einzelnen Produkte eines Arbeitsschritts benötigt, welche zumeist erst für die Planung aufgenommen werden müssen. Darüber hinaus erfahren produzierende KMU aufgrund der noch zu hohen Beschaffungsaufwände bislang noch keine volatilen Strompreise. Es ist zu erwarten, dass sich dies in der nahen Zukunft durch neue Tarifoptionen ändern wird. Vorher ist eine Anwendung der Methode jedoch nicht wirksam.

5 Fortgeschriebener Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum/Zeitraum
A: Internet	Information der interessierten Öffentlichkeit und Wissenstransfer in die Wirtschaft	Einrichtung einer Projekthomepage: lagbens.iph-hannover.de	04/2016
B: Pressemitteilung		Pressemitteilung zum Projektstart („Lager als Energiespeicher nutzen und Stromkosten senken“)	03.05.2016
C: Information PA		Kick-off Meeting in Hannover	29.06.2016
		2. PA-Treffen in Duisburg	23.03.2017
		3. PA-Treffen in Hannover	22.03.2018
D: Vorträge / Poster		Vortrag zur Vorstellung des Forschungsprojektes und erster Ergebnisse bei der 45. Sitzung des Arbeitskreises „Energietechnische Zukunftskonzepte“ des Verbands industrieller Energie- und Kraftwirtschaft e.V.	26.10.2016
		Vortrag zur Vorstellung der Ergebnisse des Forschungsprojektes beim e.coBizz-Fachforum der Klimaschutzagentur Region Hannover GmbH.	13.03.2018
E: wissenschaftliche Publikationen		Schweers, D.; Ullmann, G.; Nyhuis, P.: Nutzung von Lagerbestand als Energiespeicher. In: ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Carl Hanser Verlag, 111. Jg. (2016), H. 7-8, S. 421-424. ISSN 0947-0085.	07/2016
		Schweers, D.; Stonis, M.; Nyhuis, P.: Volatilitätspotenziale kostenoptimal nutzen. In: IT&Production, TeDo Verlag, 18. Jg. (2017) Heft Nr. 3, S. 100-101. ISSN 1439-7722.	05/2017
		Schweers, D.; Vogt, M.; Peil, S.: Voraussetzungen zur Planung energiekostenoptimaler Produktionsprogramme. In: VIK-Mitteilungen, Verlag Energieberatung, o. Jg. (2017), H. 5, S.28-31.	10/2017

		ISSN 0341-2318.	
F: Akademische Lehre und berufliche Weiterbildung	Qualifizierung des wissenschaftlichen Nachwuchses	<u>Betreuung der Bachelorarbeit:</u> „Entwicklung einer Methode zur Identifikation und Bewertung von Entkopplungspunkten unter Berücksichtigung einer energiekostenoptimalen Produktionsprogrammplanung“; J. von Fintel, Leibniz Universität Hannover	06-07/2016
		<u>Betreuung der Studienarbeit:</u> „Entwicklung eines Konzeptes zur Prognose von Strompreisverläufen für ein energiekostenoptimiertes Produktionsprogramm“; M. Mierke, Leibniz Universität Hannover	08-11/2016
		<u>Betreuung der Projektarbeit:</u> „Analyse der Rahmenbedingungen der Eigenfertigungsprogrammplanung zur Nutzung von Lagerbestand als Energiespeicher“; S. Müller, Leibniz Universität Hannover	10/2016-04/2017
		<u>Betreuung der Bachelorarbeit:</u> „Entwicklung eines Modells zur Planung von kostenoptimalen Produktionsprogrammen zur Nutzung von Lagerbestand als Energiespeicher“; M. Rosic, Leibniz Universität Hannover	01-06/2017
		<u>Betreuung der Masterarbeit:</u> „Energiekostenoptimierung im Produktionsprozess“, F. von Ohlen, Technische Universität Clausthal	01-07/2017
		<u>Betreuung der Masterarbeit:</u> „Energiewirtschaftliche Betrachtung einer strompreisabhängigen Fertigung mit Nutzung von Lagerbeständen als Stromspeicher als Mittel des Demand Side Managements“, M. F. Wächter, TU Darmstadt	04-10/2017

Geplante Transfermaßnahmen nach Abschluss des Projektes

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Datum/Zeitraum
C: Vorträge/ Poster	Information der interessierten Öffentlichkeit und Wissenstransfer in die Wirtschaft	Denise Schweers: Production Program Planning for the Use of Stock Levels as an Energy Storage Solution. Vortrag. 9 th International Scientific Symposium on Logistics, Magdeburg	14. Juni 2018
D: wissenschaftliche Publikationen	Information der interessierten Öffentlichkeit und Wissenstransfer in die Wirtschaft	Schweers, D., Stonis, M., Nyhuis, P.: Production Program Planning for the Use of Inventory Levels as an Energy Storage Solution; 9 th International Scientific Symposium on Logistics, Magdeburg 13-14.06.2018. Schweers, D.; Vogt, M.; Peil, S.: Anwendung eines Modells zur Planung energiekostenoptimaler Produktionsprogramme. In: VIK-Mitteilungen, Verlag Energieberatung, o. Jg. (2018) Heft 4 oder 5/2018 (angefragt)	Sommer 2018

Einschätzung zur Realisierbarkeit des Transferplans

Die ursprünglich geplanten Transfermaßnahmen sind größtenteils umgesetzt oder konkret geplant und werden daher mit großer Wahrscheinlichkeit vollständig realisiert.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In Anbetracht des Ausbaus erneuerbarer Energien sehen Unternehmen sich mit einem zunehmend volatilen Stromangebot konfrontiert. Durch eine Anpassung der Produktionsplanung und -steuerung können Unternehmen ihren Stromverbrauch regeln und folglich Kosteneinsparungen erzielen. In dem vorliegenden Forschungsprojekt wurde eine Methode zur Planung energiekostenoptimaler Produktionsprogramme unter der gezielten Nutzung von Lagerbestand als Speicher von im Produktionsprozess umgesetzter Energie entwickelt.

Die Ergebnisse des Projektes haben gezeigt, dass ein deutliches Einsparpotential mit teilweise nur geringen zusätzlichen Lagerbeständen erzielt werden kann. Doch gilt es zu beachten, dass die ermittelten Prozentsätze nur für die betrachteten Umgebungen gelten. Darüber hinaus berücksichtigt die entwickelte Methode nur die Arbeitspreise der Strompreise und berücksichtigt dabei keine zusätzlichen Stromkosten wie Leistungspreise, Netztarife, sonstige Abgaben und Steuern.

Die Lagerkosten im Vergleich zu den Energiekosten sowie ein starker Einfluss der Ungenauigkeit der Strompreisprognose wirken sich signifikant auf die resultierenden Einsparungen aus. Eine gewinnbringende Nutzung des Optimierungsmodells basiert außerdem auf der Belastungsflexibilität des Unternehmens, die die jeweilige Fähigkeit definiert, Produktionsbedarfe zeitlich vorzuziehen. Daher muss die Implementierung des Optimierungsmodells situativ beurteilt werden und kann nicht generell empfohlen werden. Es besteht jedoch ein großes Potenzial bei der Verwendung eines Planungstools mit der alternativen Beschaffung von Energie mit Futures, wodurch etwaige Ungenauigkeiten der Prognose im Voraus eliminiert würden. Hier könnten weitere Untersuchungen ergeben, ob die Planungssicherheit und die damit verbundene optimale Produktionsplanung höhere Einkaufspreise rechtfertigen und eine zuverlässige Kostensenkung ermöglichen.

Trotz der gezeigten Einschränkungen bei der Energiekostenoptimierung können Einsparungen bereits mit dem entwickelten Optimierungsmodell realisiert werden. Wird die Einspeisung erneuerbarer Energien weiter vorangetrieben, ist davon auszugehen, dass der Strompreis im Durchschnitt steigen und gleichzeitig eine größere Streuung aufweisen wird. Von der zunehmenden Automatisierung der Produktionsanlagen kann auch erwartet werden, dass sich der Energieverbrauch bei sinkenden Personalkosten erhöht. Beide Effekte werden das Einsparpotenzial weiter erhöhen und bieten in Kombination mit einer engeren

Schlussbericht IGF 19073 N

Zusammenarbeit zwischen produzierenden Unternehmen und Energieversorgern ein enormes Optimierungspotenzial.

7 Literatur

- [Age17] AG Energiebilanzen e.V.
<https://1-stromvergleich.com/strom-report/strommix/#strommix-deutschland-2017> (zuletzt gesehen 6. Juli 2018)
- [Ago12] Agora Energiewende. 12 Thesen zur Energiewende
https://www.agora-energiewende.de/fileadmin2/Projekte/2012/12-Thesen/Agora_12_Thesen_Langfassung_2.Auflage_web.pdf (zuletzt gesehen 5. Juli 2018)
- [EUR18] EUROSTAT – Energiestatistik-Preise für Gas und Elektrizität (ab 2007); Preise Elektrizität für Nichthaushaltskunde, ab 2007 – halbjährliche Daten.
<http://ec.europa.eu/eurostat/data/database> (zuletzt gesehen 18. Juli 2018)
- [Wir18] Wirth, H. (Hrsg.): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Fraunhofer ISE, Fassung vom 14.06.2018, www.pv-fakten.de (zuletzt gesehen am 04. Juli 2018)